

ANALYSE DU POTENTIEL DE PRODUCTION DE BIOCARBURANTS PAR LA
CULTURE DE CANOLA (*BRASSICA NAPUS* L.) SUR LES TERRES MARGINALES DU
QUÉBEC ET RÉDUCTION DES IMPACTS LIÉS À SA CULTURE

par

Charles Beaudette

mémoire présenté au Département de biologie en vue
de l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada, 21 avril 2010



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-65613-6
Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-65613-6

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

Le 4 août 2010

*le jury a accepté le mémoire de Monsieur Charles Beaudette
dans sa version finale.*

Membres du jury

Professeur Robert L. Bradley
Directeur de recherche
Département de biologie

Professeur Donald L. Smith
Codirecteur de recherche
Département des sciences
Université McGill

Professeure Anne Vanasse
Membre externe
Département de phytologie
Université Laval

Professeur Joan Whalen
Membre externe
Département des sciences
Université McGill

Professeur John-William Shipley
Président rapporteur
Département de biologie

SOMMAIRE

Le réchauffement global du climat serait attribuable majoritairement aux émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère par les activités humaines comme la combustion des combustibles fossiles, la déforestation et les activités agricoles. Les biocarburants, des combustibles renouvelables et capables de mitiger les émissions de gaz à effet de serre, pourrait réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et aider à la lutte contre les changements climatiques. De plus, L'implantation de systèmes de culture intercalaire (SCI) serait une alternative de choix permettant de revaloriser les terres marginales québécoises et restaurer une partie de leur fertilité originelle, ce qui permettrait de faire pousser les cultures de biocarburants sans faire compétition aux cultures nourricières déjà présentes sur les terres agricoles fertiles. Le présent travail s'inscrit donc au sein d'un réseau de chercheurs pan-canadien, le réseau des cultures vertes, afin de déterminer les rendements potentiels d'une culture de canola pour la production de biocarburants sur des terres marginales et d'évaluer l'impact de cette culture sur les émissions d'oxyde nitreux, un puissant gaz à effet de serre.

Nous avons démontré au premier chapitre que la culture de biocarburants sur les terres marginales québécoises est possible avec l'implantation de systèmes de culture intercalaire, que ces systèmes peuvent mitiger les émissions d'oxyde nitreux des terres agricoles et que certains cultivars de canola performants peuvent aussi accroître les émissions d'oxyde nitreux.

Dans le second chapitre, nous avons trouvé une tendance vers des rendements supérieurs et des besoins nutritionnels inférieurs pour les biocarburants de deuxième génération en comparaison avec ceux de la première génération et nous avons estimé que la substitution du tiers de notre consommation de combustibles fossiles serait réalisable avec 10 % des terres agricoles mondiales ainsi que les terres marginales par la production de biocarburants.

Mots-clés : Biocarburant, canola, agroforesterie, gaz à effet de serre, oxyde nitreux, fertilisant

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon superviseur Dr. Robert L. Bradley pour son soutien et sa grande disponibilité tout au long de ma maîtrise. J'aimerais également remercier mon co-directeur Dr. Donald L. Smith pour son optimisme contagieux et sa grande générosité, ainsi que les membres de mon comité de maîtrise, Dr. Bill Shipley et Dre. Anne Vanasse pour leurs judicieux conseils et leur expertise respectifs dans le domaine des statistiques et de l'agronomie. J'aimerais adresser un remerciement très spécial au coordonnateur de laboratoire Benoît Lapointe pour son temps et ses connaissances techniques qui me furent d'un grand secours durant mon terrain.

Le projet n'aurait pas pu être mené à terme sans l'aide des nombreux stagiaires qui sont venus donner un précieux coup de main: Mélanie Bergeron, Jul Bradley, Médéric Lanoix, Xavier Francoeur, Philippe Grégoire, Gilles Joannis, Hilde Marie Johansen, André-Anne Lamarche, Jérôme Quirion, David Robert, Renée Roy et Maxime Thibeault. J'aimerais également remercier Mme Marielle B. Arès pour m'avoir permis de mener l'ensemble de mes expériences sur ses terres. Je veux aussi remercier les gens du laboratoire, et tout spécialement Mathieu Dufresne, pour m'avoir permis de lâcher mon fou à quelques reprises durant mes études graduées.

Aussi, j'aimerais remercier mes parents, frères et amis pour leur support inconditionnel, ainsi que ma copine pour endurer son boodett's au quotidien.

Ce projet a été rendu possible grâce au support financier du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) par les subventions accordées au réseau des cultures vertes (Green Crop Network, GCN).

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
INTRODUCTION.....	1
 CHAPITRE 1 - TREE-BASED INTERCROPPING DOES NOT COMPROMISE CANOLA (BRASSICA NAPUS L.) SEED OIL YIELD AND REDUCES SOIL NITROUS OXIDE EMISSIONS.....	 3
1. Avant-propos.....	4
2. Abstract.....	6
3. Introduction.....	7
4. Materials and Methods.....	10
4.1. Experimental design.....	10
4.2. N ₂ O flux measurements.....	12
4.3. Soil sampling and analyses.....	13
4.4. Physiological measurements.....	14
4.5. Yield estimates.....	14
4.6. Statistical analyses.....	15
5. Results.....	16
5.1. Seed oil concentration and yield	16
5.2. N ₂ O emissions.....	20
5.3. Plant leaf traits.....	21
5.4. Soil moisture, microbial biomass and potential nitrification.....	23
6. Discussion.....	25

7. Conclusion.....	27
8. References.....	29
 CHAPITRE 2 - PERSPECTIVE DES RENDEMENTS ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CULTURES DE PREMIÈRE ET DEUXIÈME GÉNÉRATION DESTINÉES À LA PRODUCTION DE BIOCARBURANTS.....	32
1. Avant-propos.....	32
2. Introduction.....	34
3. Développement.....	37
3.1. Intrants fertilisants.....	37
3.2. Émissions de gaz à effet de serre.....	41
3.3. Superficie agricole nécessaire.....	45
4. Conclusion.....	48
5. Bibliographie.....	50
 CONCLUSION.....	52
BIBLIOGRAPHIE.....	54

LISTE DES TABLEAUX

1.	Average soil properties at the St-Edouard experimental site before fertilization in 2007.....	11
2.	Effects of canola cultivar and plant environment on photosynthetic rates (A_{400}) and specific leaf area (SLA) of canola leaves grown in 2007 and 2008. Also displayed are significant interactions between fertilizer-N rate x canola cultivar in controlling photosynthetic rates. Standard errors are shown in parentheses. Italicized lower-case letters represent statistically different ($\alpha = 0.05$) means, according to Tukey's HSD test.....	22
3.	Effects of plant environment (TBI at 1, 4 and 7 m distance from poplar rows, and CM) on soil water content and potential nitrification rates. Different lower-case letters in italic represent statistically significant ($P < 0.05$) means within each year, according to Tukey's HSD test. Standard errors are shown in parentheses.....	23
4.	Valeurs d'émissions de gaz à effet de serre mitigées par l'utilisation de biocarburants et produits par l'utilisation de fertilisants en azote pour différents types de culture associés à la production de biocarburants de première et deuxième génération. On suppose ici un coût de transport et de manufacture de 2.9 kg d'équivalent CO_2 par kg de fertilisant produit ainsi qu'un coût de dégradation du fertilisant sous forme de N_2O de 4.65 kg d'équivalent CO_2 par kg de fertilisant produit (Snyder et al., 2009). Le tableau se base sur les données présentées à la figure 6, avec l'étendue possible répertoriée dans la littérature suivie de la valeur moyenne estimée entre parenthèse.....	42

LISTE DES FIGURES

1.	Average canola seed oil concentrations in relation to (a) fertilizer-N application rates and (b,c) plant environments. Different lower-case letters designate statistically significant ($P < 0.05$) means within each frame according to Tukey's HSD test. Error bars = 1 S.E.....	16
2.	Average canola seed oil yield in relation to fertilizer-N application rates and plant environments. Lines and curves represent significant linear and quadratic trends. Error bars = 1 S.E.....	18
3.	Average seed oil concentration and yield of canola cultivars tested in 2007 and 2008. Different lower-case letters designate statistically significant ($P < 0.05$) means within each frame according to Tukey's HSD test. Error bars = 1 S.E.....	19
4.	Average soil nitrous oxide (N_2O) emissions in relation to (a) plant environments and (b) canola cultivars, over the 2008 growing season. Different lower-case letters designate statistically significant ($P < 0.05$) means within each frame according to Tukey's HSD test. Error bars = 1 S.E.....	20
5.	Soil microbial biomass in relation to plant environments and canola cultivars, over the 2008 growing season. Different lower-case letters designate statistically significant ($P < 0.05$) means within each cluster according to Tukey's HSD test. Error bars = 1 S.E.....	24
6.	Intrants de fertilisants azotés et rendements en biocarburants de cinq cultures de première génération et quatre cultures de deuxième génération. Les barres d'erreur montrent l'étendue des intrants ou rendements de la littérature citée dans le texte. L'acronyme GDFI signifie « grande diversité à faible intrants », traduit de l'anglais LIHD (low-input high-diversity), introduit par Tilman et al. (2006).....	38

INTRODUCTION

En 2007, le panneau intergouvernemental sur les changements climatiques a publié son quatrième rapport d'évaluation sur le phénomène des changements climatiques. Dans ce rapport, l'organisme dresse un portrait alarmant des conséquences des activités humaines sur le climat et les écosystèmes (IPCC, 2007). En effet, le phénomène du réchauffement global du climat serait attribuable en grande partie aux émissions considérables de gaz à effet de serre rejetés dans l'atmosphère, qui proviennent majoritairement de la combustion des combustibles fossiles, de la déforestation ainsi que des activités agricoles. De plus, il est probable que ce réchauffement climatique deviendra la cause de l'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes, comme les ouragans, de la désertification de certaines régions du globe, de l'inondation d'une quantité importante de régions côtières ainsi que de problèmes d'approvisionnement et de qualité de l'eau.

C'est dans l'optique de mitiger l'impact des changements climatiques sur les populations humaines ainsi que sur les écosystèmes que certains groupes de recherche ont vu le jour au niveau national et international, dont le réseau des cultures vertes (Green Crop Network ou GCN). Il s'agit d'un réseau pan-canadien de chercheurs qui se spécialise dans la gestion durable des gaz à effet de serre au sein des systèmes de production agricole. Parmi les nombreux volets de recherche entrepris par ce réseau, l'un d'entre eux consiste à trouver des cultures agricoles présentant un fort potentiel de production de biocarburants, des combustibles renouvelables pouvant remplacer l'utilisation des combustibles fossiles et fabriqués par les plantes à partir des gaz à effet de serre atmosphériques.

Par contre, la culture de biocarburants s'effectue la plupart du temps sur des terres agricoles fertiles qui servent déjà à nourrir les populations humaines. De plus, l'organisme Statistique Canada a estimé en 2006 que, depuis 1960, la moitié des terres agricoles du Québec n'ont maintenant plus de vocations agricoles (Statistique Canada, 2006). Une grande partie de ces

terres sont maintenant des terres marginales, épuisées par une agriculture trop intensive pour être ensuite laissées à l'abandon par les producteurs agricoles parce que leurs rendements ne sont pas économiquement rentables. L'implantation de systèmes agroforestiers, comme les systèmes de culture intercalaire (SCI), serait une alternative de choix permettant de revaloriser ces terres marginales par la culture d'espèces ligneuses qui contribueraient à restaurer une partie de la fertilité originelle du site (Rivest et Olivier, 2007). Il serait alors possible de faire pousser les cultures de biocarburants sur ces terres marginales converties et donc de ne pas faire compétition avec les cultures nourricières.

Mon projet de maîtrise a consisté à entreprendre une série d'expérience pouvant répondre à des objectifs de recherche pertinents s'inscrivant au sein des axes de recherche du réseau des cultures vertes sur des terres marginales du Québec, en monoculture ainsi qu'en système de culture intercalaire. En premier lieu, j'ai élaboré avec l'aide de mon superviseur Dr. Robert L. Bradley une série d'expérience visant à tester le potentiel de la culture de canola pour la production de biocarburants et à évaluer les variations de ce potentiel selon les cultivars utilisés, le taux de fertilisants en azote appliqués et le type de système agricole dans lequel la culture a poussé. Dans un deuxième temps, je me suis également intéressé aux émissions d'oxyde nitreux (N_2O), un puissant gaz à effet de serre, produit par les activités agricoles afin d'observer dans quelle mesure les traitements expérimentaux établis lors du premier volet de mes recherches peuvent influencer les émissions de N_2O provenant de la culture de canola.

Le premier chapitre de ce mémoire consiste donc en les résultats de ces deux volets de recherche présentés sous la forme d'un article scientifique. Le deuxième chapitre consiste quant à lui en une revue de littérature des rendements et impacts environnementaux d'une grande variété de cultures de biocarburants de première et deuxième génération, présentée sous la forme d'un essai.

CHAPITRE 1

TREE-BASED INTERCROPPING DOES NOT COMPROMISE CANOLA (BRASSICA NAPUS L.) SEED OIL YIELD AND REDUCES SOIL NITROUS OXIDE EMISSIONS

C. Beaudette^a, R.L. Bradley^{*a}, J. Whalen^b, P.B.E. McVetty^c, K. Vessey^d, D.L. Smith^e

^a Département de biologie, Université de Sherbrooke, 2500 boul. de l'Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada.

^b Department of Plant Science, Macdonald Campus, McGill University, Ste-Anne-de-Bellevue, Quebec, H9X 3V9, Canada.

^c Department of Plant Science, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, R3T 2N2, Canada.

^d Department of Biology, Saint Mary's University, Halifax, Nova Scotia, B3H 3C3, Canada.

^{*} Author for correspondence: Robert.Bradley@USherbrooke.ca

Tel : 1-819-821-8000, ext. 62080

Fax : 1-819-821-8049

1. Avant-propos

Ce chapitre comprend l'ensemble des expériences que j'ai menées au cours de ma maîtrise. Essentiellement, il tente de répondre aux questions suivantes :

- De quelle façon les rendements de différents cultivars de canola, destinée à la production de biocarburants, sont-ils influencés par la fertilisation en azote et par le système de culture dans lequel la culture est implantée ?
- Quels sont les impacts de la culture de ces cultivars sur les émissions de gaz à effet de serre par les terres agricoles et comment varient-ils en fonction de la fertilisation en azote et le système de culture dans lequel la culture est implantée ?

Ces questions reflètent bien le compromis présent au sein de la culture de biocarburants, puisqu'au-delà d'être une source d'énergie renouvelable, cette culture doit également mitiger les émissions de gaz à effet de serre par rapport à l'utilisation des combustibles fossiles pour être une alternative valable dans le schéma énergétique mondial. Or, les terres agricoles sont une source importante de gaz à effet de serre par le phénomène de dénitrification, qui relâche dans l'atmosphère une quantité importante d'oxyde nitreux (N_2O), un gaz à effet de serre 300 fois plus efficace que le dioxyde de carbone (CO_2). De plus, ce gaz est produit majoritairement sur les terres agricoles en raison de l'apport en azote que nous fournissons aux cultures pour en augmenter les rendements. En vue de considérer les bénéfices réels de la production de biocarburants sur la mitigation des gaz à effet de serre, il est donc crucial d'estimer l'empreinte écologique complète des cultures de biocarburants. Puisque les émissions d'oxyde nitreux sont réputées pour être très variables, à la fois dans l'espace et dans le temps, nous avons mis sur pied un design expérimental permettant de saisir cette variabilité, en répétant nos mesures quatre fois durant la saison, ainsi qu'en quatre blocs expérimentaux différents sur le même site. Pour permettre un aussi grand nombre de données, les chambres utilisées ont toutefois été

conçues avec un volume plus petit que celles normalement utilisées dans ce genre d'expérience. Ce compromis diminue donc sensiblement la précision de chaque mesure, mais ces dernières sont prises un plus grand nombre de fois, ce qui permet un meilleur discernement des tendances entre les traitements expérimentaux.

De plus, les expériences contenues dans ce chapitre furent menées sur des terres marginalisées du sud du Québec pour en tester le potentiel agricole pour la culture de biocarburants. Ainsi, il est possible de produire des biocarburants sans faire compétition aux ressources alimentaires mondiales. En vue d'obtenir des rendements qui restent rentables pour les producteurs agricoles, l'établissement de système de culture intercalaire (SCI; tree-based intercropping system ou TBI en anglais) propose de revaloriser les terres marginalisées en restaurant à long terme la fertilité des sols, par divers mécanismes comme un apport considérable de litière annuelle au sol par les arbres ou encore une rhizodéposition importante de carbone dans le sol par les racines des arbres, ce qui permet d'encourager le processus d'humification.

Dans ce chapitre, j'ai cerné les hypothèses de recherche de concert avec mon superviseur Dr. Robert L. Bradley. J'ai ensuite entrepris la mise en place des cultures de canola sur les terres agricoles disponibles. J'ai également fait l'ensemble du travail d'échantillonnage et de laboratoire avec l'aide de nombreux stagiaires, dont l'élaboration d'un protocole d'utilisation du chromatographe en phase gazeuse muni d'un détecteur pouvant mesurer les concentrations d'oxyde nitreux dans les échantillons gazeux récoltés tout au long de la saison 2008. J'ai analysé les données récoltées, rédigé le premier jet du manuscrit présenté dans ce chapitre et apporté les correctifs nécessaires avec mon superviseur en vue de soumettre ce manuscrit à un périodique scientifique. Le manuscrit présenté dans ce mémoire est donc la forme initiale soumise au périodique « Agriculture, Ecosystems & Environment », qui vient tout juste d'être accepté pour publication.

2. Abstract

Recent concerns over rising oil prices and greenhouse gas emissions have sparked an interest for the production of first generation biofuels on marginal agricultural land in Eastern Canada. Field trials were established to compare canola seed oil yield and soil nitrous oxide (N₂O) emissions in tree-based intercropping (TBI) and conventional monocropping (CM) systems. The 4–5 y-old TBI system comprised alternating rows of hybrid poplar and high-value hardwood species, with 8 m wide alleys. Each cropping system was planted with six canola cultivars, grown at four fertilizer-N rates. Seed oil concentrations decreased linearly with fertilizer-N, while seed oil yields increased either linearly or following a quadratic trend. An optimal fertilization rate was estimated at 80 kg N ha⁻¹. Seed oil concentrations were higher in the CM than in the TBI system, but the two systems did not differ significantly in terms of seed oil yield. N₂O emissions were three times higher in the CM than in the TBI system, probably as a result of higher soil moisture. The cultivar that produced the highest seed oil yield also produced significantly more N₂O, probably as a result of greater available C in the rhizosphere. Our results may be useful to future life cycle assessments for analyzing the net environmental impacts of producing and distributing fertilizer-N to biofuel crops, and the choice of cropping system and canola cultivar that minimize N₂O emissions. In a first instance, we conclude that our model TBI system did not compromise canola seed oil yields, while substantially reducing soil N₂O emissions.

Keywords: Biofuel, Canola (*Brassica napus* L.), N fertility, Seed oil yield, Soil N₂O emissions, Tree-based intercropping

3. Introduction

Rising oil prices and concerns about greenhouse gas emissions have sparked an interest in the production of biofuels as alternatives to fossil fuels. Canola (*Brassica napus* L.) and related Brassicaceae species (e.g. *B. rapa* L. and *B. juncea* (L.) Czern) are already important oilseed crops, providing 12% of the world's comestible vegetable oil supply (United States Department of Agriculture, 2008). As the second largest canola producing country, Canada is thus poised to increase its production of feedstock for first generation biofuels. Accordingly, the Canadian Green Crop Network (GCN) was established in 2006 to develop the scientific knowledge and technologies to grow canola to expand Canada's bio-energy portfolio.

There is a consensus emerging that bio-energy crops must not encroach on land currently producing food. In Canada, canola is primarily grown for food in the western prairie provinces, whereas eastern Canada produces less than 10 % of revenues generated by this crop (Canola Council of Canada, 2008a). In the eastern province of Quebec, the area of land under cultivation has decreased from 6.8 Mha in 1951 to 3.5 Mha in 2006 (Statistique Canada, 2006; Tessier et al., 2009). Much of this abandoned land is lying fallow and could be revitalized to grow crops such as canola for bio-energy. There is a need, therefore, to estimate potential seed oil yields of canola in the cooler and wetter climate conditions of Eastern Canada, and to test novel cropping systems that would entice would-be producers to return fallow land into biofuel crop production. Field trials should focus on the response of seed oil yield to soil N fertility. On the one hand, total seed yields are expected to increase with soil N fertility, but a concomitant increase in seed protein content could result in lower seed oil concentrations.

Incentives to cultivate abandoned land are possible through innovative ideas that provide landowners with market outlets for value-added production systems. Tree-based intercropping (TBI), which consists of widely spaced tree rows and annual alley crops, is one such system with potential economic and environmental benefits (Bradley et al., 2008). Within a TBI

system, tree roots may absorb nutrients that are leached below the rooting zone of alley crops thereby increasing nutrient cycling efficiency and decreasing environmental impacts (Allen et al., 2004). When combining fast-growing short-rotation trees such as hybrid poplars (*Populus spp.*) and high-value hardwood trees such as black walnut (*Juglans nigra* L.), TBI systems are expected to supplement the landowners' income over that he would receive by conventional mono-cropping (CM) (Gordon, 2008). Within the context of future cap-and-trade carbon markets, TBI systems could also generate revenues because trees fix atmospheric CO₂ during their growth and tend to increase soil C sequestration (Peichl et al., 2006). It is uncertain, however, whether trees will interfere with or facilitate the growth of canola when it is grown as an alley crop. On the one hand, TBI systems have been shown to improve soil fertility (Thevathasan and Gordon, 2004), but trees also compete for soil resources and cast shade on the intercrop, which could reduce yields. It is, therefore, necessary to compare canola seed oil concentrations and yields in TBI and CM systems.

One major concern related to the agronomic production of biofuels is the impact this activity may have on soil denitrification, the process by which nitrate (NO₃⁻) is reduced by facultative anaerobic bacteria. Nitrous oxide (N₂O), a volatile intermediate product in the denitrification pathway, is approximately 300 times more effective (per mole) as a greenhouse gas than CO₂ (Forster et al., 2007). The environmental benefits of producing bio-energy to reduce CO₂ emissions from fossil fuels could thus be offset if the associated agronomic practices increase soil N₂O emissions. Denitrification rates are increased by the availability of soil NO₃⁻ acting as terminal electron acceptor during cellular respiration, the availability of reduced C compounds that drive heterotrophic metabolism, and by low oxygen concentrations. Denitrification is thus expected to increase with fertilizer N application, with crops producing high amounts of labile rhizodeposition products, and with cropping systems that maintain high soil moisture.

We report on canola field trials established on revitalized fallow land in the province of Québec, as part of the GCN's research activities. Three canola cultivars were grown in each of

2007 and 2008, on a pilot study site that included replicated TBI and CM systems, each cropped at four N fertility levels. We hypothesized that yields would be lower near the tree rows than in the center of the alleys because of competition for light and soil resources. We also hypothesized that seed oil concentration would decrease with increasing soil N fertility, and tested how this would affect seed oil yield. Lastly, we hypothesized that denitrification would increase with N fertilization, and also tested how canola cultivars and cropping systems would affect N₂O emissions. In order to gain insights into the factors controlling seed oil yield and N₂O emissions, we also measured soil moisture, soil microbial biomass, potential nitrification rates, as well as foliar traits.

4. Materials and Methods

4.1. Experimental design

Field trials were conducted at St-Édouard-de-Maskinongé, Qc (46°20' N, 73°11' W) in 2007 and 2008. Soil characteristics are given in Table 1. The experimental design consisted of TBI and CM systems replicated in four blocks. The TBI systems consisted of rows of high-value hardwood species (*Fraxinus americana* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall and *Quercus rubra* L.) alternating with rows of fast-growing hybrid poplars (*Populus x canadensis* "Stormont" and *Populus x canadensis*), all planted in the spring of 2004. The tree rows were oriented along a South-West to North-East axis. Adjacent tree rows were separated by 8 m wide alleys in which canola was sown in each of the two study years. In 2007, the high-value hardwoods were about 1 m tall whereas the hybrid poplars were about 4 m tall, with a well developed canopy. Alleys were disk-harrowed in mid-May, prior to sowing and fertilizing. Twelve treatments, consisting of three canola cultivars x four N fertility rates, were randomly assigned to 12 plots within each replicated cropping system. These 8 m long alley plots were established perpendicular to two adjacent tree rows, with hybrid poplars on the South-East side and slow-growing hardwoods on the North-West side of the alley. Given the space constraint of fitting twelve treatment plots into TBI and CM cropping systems of pre-established size, each treatment plot was 1 m wide. In order to reduce possible edge effects, adjacent plots were separated by 30 cm wide geo-textile strips. The plots in the CM systems were identical in size and orientation to those in the TBI systems, but excluded the tree rows.

Table 1

Average soil properties at the St-Edouard experimental site before fertilization in 2007.

Texture	Sandy loam
Organic matter (%)	4.59
Total C (mg/g)	26.65
Total N (mg/g)	1.99
C:N Ratio	13.39
Mehlich-extractible P (ppm)	1.20
Mehlich-extractible K (ppm)	4.37
pH _{water}	5.9

The canola cultivars used in 2007 were Q2, Sentry and 46A65. These cultivars vary in seed yield and seed oil concentration. Q2 is a high seed yield, blackleg resistant cultivar (Stringam et al., 1999). Sentry is blackleg resistant, medium seed oil concentration cultivar (Rimmer et al., 1998). 46A65 is a Pioneer Hi-Bred, high seed yield, blackleg resistant cultivar (Canola Council of Canada, 2008b). The canola cultivars used in 2008 were Polo, Topas and 04C204. Polo is a Danisco-bred, high oil concentration cultivar (Rahman et al., 2001). Topas is a Swedish spring canola cultivar marketed in 1982, created from parental lines (Bronowski x Gulle) x Hermes (Nordic Genetic Resource Center, 2009). 04C204 is a very high oil yield line (hereafter referred to as “cultivar”) recently developed by the Plant Science Department, University of Manitoba.

Sowing was done by hand in the third week of May. Plant density was estimated at approximately 60 plants m⁻², below the recommended density of 80 plants m⁻² (Conseil des productions végétales du Québec, 1996). According to Angadi et al. (2003), yields are not significantly altered at this density because canola plants compensate with increased

branching. The four fertilizer N rates were 0, 40, 80 and 120 kg N ha⁻¹ applied as urea by hand. All plots received a blanket application of 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ and 80 kg K₂O ha⁻¹ according to provincial guidelines (CRAAQ, 2003), applied as triple superphosphate and potash. Boron and sulphur were also added in 2008, at 2 and 20 kg ha⁻¹ respectively.

Within TBI systems, the taller hybrid poplar rows were expected to create a gradient of light and soil conditions. For this reason, plots within TBI systems were sampled in “subplots” at 1 m, 4 m and 7 m from the row of hybrid poplars. These three subplots, along with a single sampling location in the center of each CM plot, comprised a third experimental factor that we designated as the “plant environment”. Thus, the full experimental design consisted of a full factorial array of three canola cultivars x four fertilizer N rates x four plant environments, replicated four times (N = 192).

4.2. N₂O flux measurements

In 2008, soil N₂O emissions were measured with closed-top cylindrical chambers (5.25 cm radius x 15 cm high) on four dates (July 8th, July 22nd, August 5th and August 22nd). The top 5 cm of each chamber was insulated with foam and equipped with a rubber septum. Cylinders were inserted 10 cm deep into the soil in each of the 192 treatment plots, and 8 ml of headspace air was sampled after 1 h. Soil temperature at 5 cm depth was monitored for each sample. During the incubation, a 22 gauge needle was kept inserted in the septum in order to maintain equal gas pressure with the surrounding air while minimizing N₂O loss from the headspace (Hutchinson and Mosier, 1981). Gas samples were injected into 3.0 ml BD Vacutainer® Plus plastic serum tubes (Becton- Dickinson and Co., Franklin Lakes, NJ) and transported to the laboratory where N₂O concentrations were measured using a Varian CP-3800 gas chromatograph (Varian Inc., Palo Alto, CA) equipped with a 80-100 mesh Haysep® packed column, an electron capture detector (ECD), with ultra-high purity N₂ as carrier gas.

N₂O measurements were corrected to a common temperature of 20 °C by assuming $Q_{10} = 2$, and extrapolated to a ha⁻¹ day⁻¹ basis.

4.3. Soil sampling and analyses

A soil sample (0-10 cm) was collected from each of the 192 sampling locations twice in 2007 (July 3rd and August 11th), and following each N₂O measurement in 2008. These were transported to the laboratory where they were sieved (2 mm) and kept at 4 °C until analyzed. Soil water content was determined by weight loss after drying subsamples at 101° C for 72 h.

Soil available C in each soil sample was inferred from microbial biomass (Bradley and Fyles, 1995) measured by substrate induced respiration (SIR) rates (Anderson and Domsch, 1978). Soil subsamples (20 g dry wt. equiv.) were placed in 500 ml plastic containers and amended with ground and sieved (65 µm) glucose (1000 µg C g⁻¹). Glucose was first mixed with talc (9:1 = talc:glucose), and 500 mg of the mixture was dispersed through each soil subsample using a handmixer with one beater. The subsamples were left uncovered for 100 min in order to reach optimum SIR rates (Anderson and Domsch, 1978). The headspace of each container was then flushed for 5 min with ambient air and sealed with lids equipped with rubber septa. Headspace air was sampled after 30 min using a needle and syringe, and CO₂ concentrations were detected with a CP-2002 P Micro-GC gas chromatograph (Chrompack, Middelburg, The Netherlands) equipped with a thermal conductivity detector (TCD), using He as carrier gas. SIR rates were corrected to 20 °C by assuming $Q_{10} = 2$ and converted to microbial biomass with equations derived by Anderson and Domsch (1978).

Potential nitrification rates were measured by placing 25–30 g fresh subsamples in Mason jars, covering these with a polyethylene film to allow gas exchange and prevent dessication, and incubating in the dark at ambient temperature for 30 days. Soil subsamples were then extracted in 100 ml of 1N KCl solution, stirred for 1 h on a rotary shaker, and the supernatants poured through Whatman No. 5 filter papers. Logistical constraints prevented us from

analyzing all of the extracts, therefore samples were pooled across cultivars and N fertility levels to test only the effects of “plant environment” on potential nitrification. Pooled extracts were analyzed colorimetrically for NO_3^- using a Technicon Autoanalyser (Pulse Instrumentations Ltd., Saskatoon, Canada), with sulphanilamide color reagent and a Cu-coated Cd reduction column.

4.4. Physiological measurements

Photosynthetic rates (A_{400}) were measured in each subplot once in 2007 during the flowering stage (July 21st-23rd), and three times in 2008, at stem elongation (June 27th-28th), early flowering (July 11th-12th) and late flowering stages (July 30th-31st), using a LI-COR 6400 portable photosynthesis system (LI-COR Inc., Lincoln, NE). Measurements were made on a newly expanded leaf borne on the main shoot of a randomly chosen plant. In 2007, the leaf remained on the plant during the measurement, while in 2008 the leaf was clipped from the plant and placed in a water tube in order to rehydrate prior to measurement (Wong et al., 1979). Each measurement was achieved under a photosynthetic photon flux density of $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, and at a CO_2 concentration of 400 ppm. All leaves were then kept in total darkness during 48 h to deplete their sugar reserves (Garnier et al., 2001), scanned to determine their surface with WinFOLIA© software (Regent Instruments Inc., Quebec, Canada), dried at 30° C for two days and weighed. Specific leaf area (SLA) was thus estimated for every leaf as the ratio of leaf surface area to dry mass.

4.5. Yield estimates

The 192 subplots were harvested by hand at the end of August of each year. Ten plants were randomly chosen, air-dried at 30°C for 1 wk, and threshed to extract the seeds. Seeds were weighed and sent to the Plant Biotechnology Institute – National Research Council (Saskatoon, Canada) in 2007, and to the Department of Plant Science – University of Manitoba (Winnipeg, Canada) in 2008, to be analyzed for seed oil concentration by near

infrared spectroscopy. Seed oil yield in each subplot was estimated from seed weight of 10 plants, planting density and seed oil concentration.

4.6. Statistical analyses

Linear mixed-effects models were used to control the effects of sampling date and blocks (i.e. random variables) while testing the effects of cultivar, N fertility and plant environment, as well as their interactions, on all response variables. The models took into account the nested structure of the split-plot design. Orthogonal polynomials were used to test the statistical significance of linear and quadratic trends in yield as a function to N-fertility. Tukey's HSD tests were used to reveal statistically different means in the other response variables. All tests were performed using the lmer package from R statistical software (2009) and used $\alpha = 0.05$ to designate statistical significance.

5. Results

5.1. Seed oil concentration and yield

In both years, seed oil concentration decreased linearly ($P < 0.01$) with fertilizer-N application rate (Fig. 1a). Average seed oil concentration in 2007 (43.7 %) was lower ($P < 0.01$) than in 2008 (49.1 %). Seeds harvested at 1 m and 4 m from poplar rows in the TBI system had lower oil concentrations (42.7 % and 48.5 % for 2007 and 2008 respectively) than those grown in the CM system (46.6 % and 50.9 % for 2007 and 2008 respectively) (Fig. 1b,c).

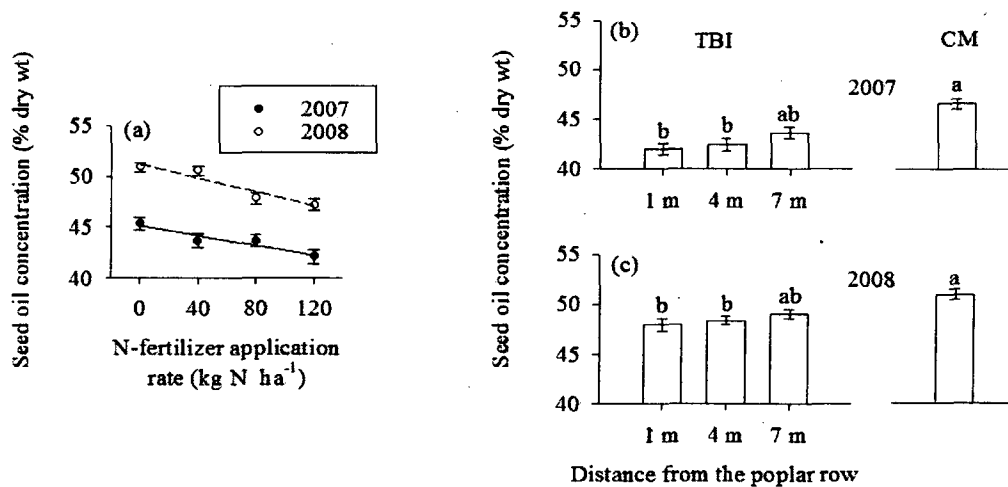


Figure 1. Average canola seed oil concentrations in relation to (a) fertilizer-N application rates and (b,c) plant environments. Different lower-case letters designate statistically significant ($P < 0.05$) means within each frame according to Tukey's HSD test. Error bars = 1 S.E.

Yields ranged from 0.7 to 1.3 Mg ha⁻¹ in 2007 and from 1.0 to 2.2 Mg ha⁻¹ in 2008. In 2007, seed oil yield increased linearly ($P < 0.01$) with fertilizer-N application rate (Fig. 2a). Seed oil yield at 1 m from poplar rows was lower ($P < 0.01$) than at 7 m. In 2007, average seed oil yield in the TBI system was numerically higher (1.1 Mg ha⁻¹) than in the CM system (0.9 Mg ha⁻¹), but the difference was not statistically significant. In 2008, seed oil yield was affected by an interaction ($P = 0.02$) between N fertilization rate and plant environment (Fig. 2b). More specifically, a quadratic trend ($P = 0.02$) between yield and fertilizer-N application rate was observed at 1 m ($P < 0.01$) and 7 m ($P = 0.02$) from the tree rows, whereas a linear trend was observed at 4 m and in the CM system. In 2008, average seed oil yield in the TBI system was lower (1.6 Mg ha⁻¹) than in the CM system (1.9 Mg ha⁻¹), but the difference between the two systems was only significant ($P < 0.01$) at the highest fertilizer-N application rate. The two treatments that provided the highest yield (2.8 Mg ha⁻¹) were 04C204 fertilized with 80 kg N ha⁻¹, grown either in the CM system or at a 4 m distance from poplar rows in the TBI system.

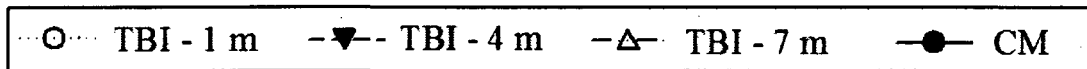
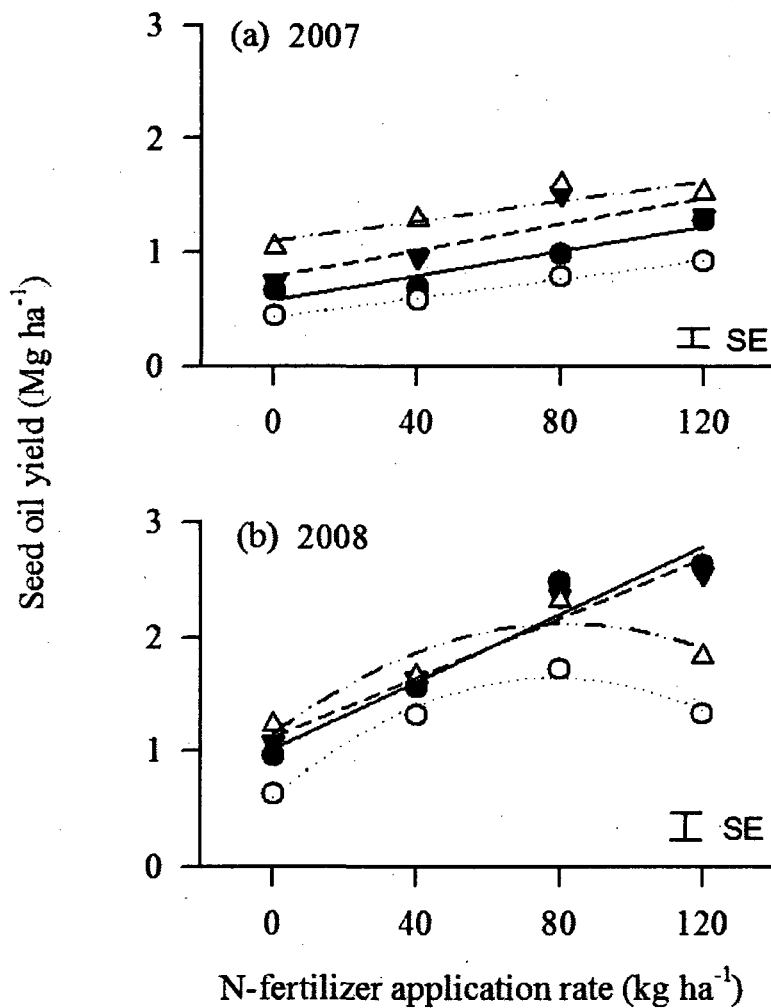


Figure 2. Average canola seed oil yield in relation to fertilizer-N application rates and plant environments. Lines and curves represent significant linear and quadratic trends. Error bars = 1 S.E.

In both years, cultivars had an effect on seed oil concentration and yield. In 2007, seed oil concentration was lower ($P < 0.01$) for Q2 (42.2 %) than for 46A65 (44.0 %) and Sentry (44.8

%) (Fig. 3a). In 2008, seed oil concentration was higher ($P<0.01$) for Polo (51.0 %) than for Topas (47.7 %) and 04C204 (48.5 %) (Fig. 3b). In 2007, Sentry had higher ($P=0.03$) seed oil yield (1.1 Mg ha^{-1}) than Q2 (1.0 Mg ha^{-1}) (Fig. 3c). In 2008, 04C204 had higher ($P=0.04$) seed oil yield (1.9 Mg ha^{-1}) than Polo (1.6 Mg ha^{-1}) (Fig. 3d).

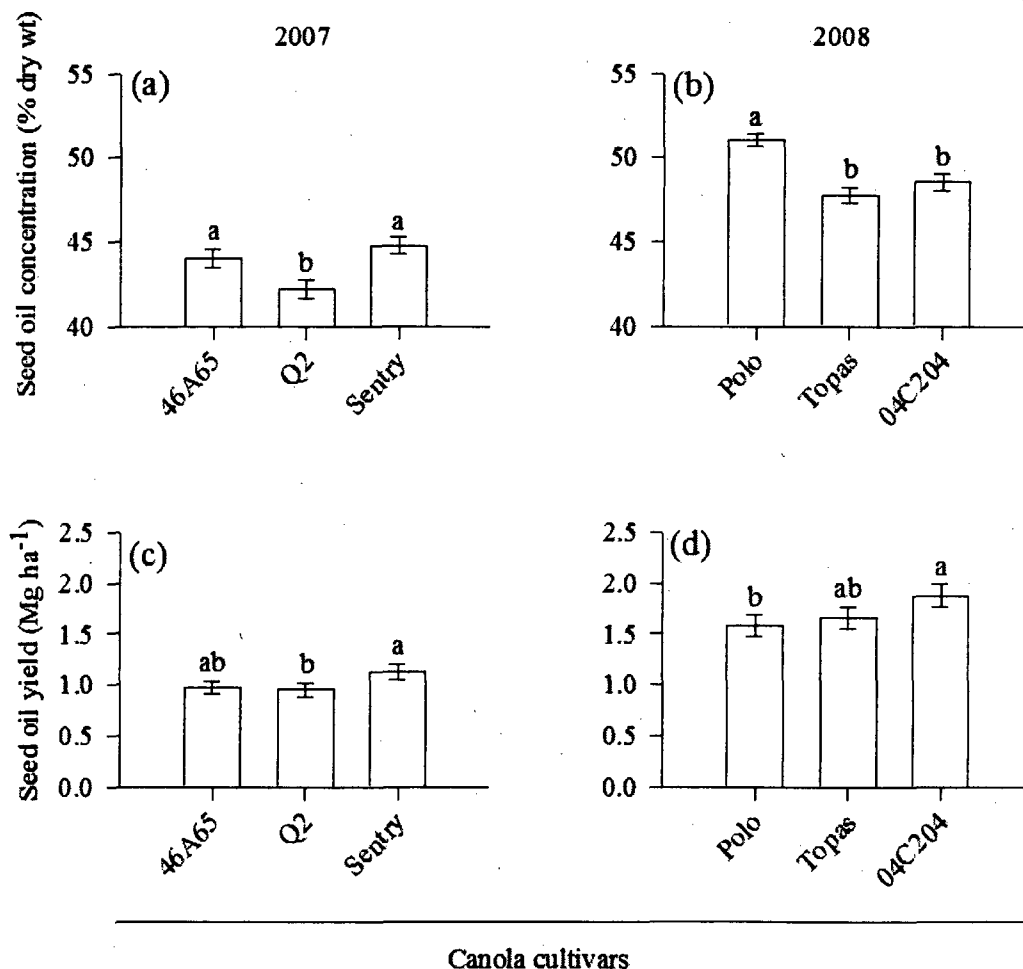


Figure 3. Average seed oil concentration and yield of canola cultivars tested in 2007 and 2008. Different lower-case letters designate statistically significant ($P<0.05$) means within each frame according to Tukey's HSD test. Error bars = 1 S.E.

5.2. N₂O emissions

Fertilizer-N application rate had no effect ($P=0.24$) on N₂O emissions in 2008. N₂O emissions were more than three times higher ($P<0.01$) in the CM system ($60 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$) than in the TBI system ($17 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$) (Fig. 4a). N₂O emissions were more than twice as high ($P<0.05$) with 04C204 ($39 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$) than with Polo ($15 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$) (Fig. 4b).

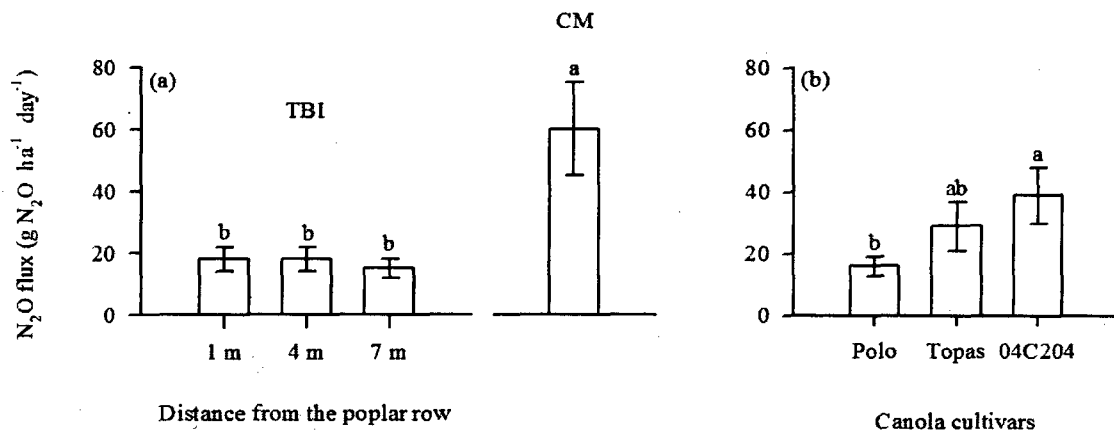


Figure 4. Average soil nitrous oxide (N₂O) emissions in relation to (a) plant environments and (b) canola cultivars, over the 2008 growing season. Different lower-case letters designate statistically significant ($P<0.05$) means within each frame according to Tukey's HSD test. Error bars = 1 S.E.

5.3. Plant leaf traits

In 2007, photosynthetic rates were 15–17 % lower ($P=0.01$) at 1 m from poplar rows than in the other three plant environments (Table 2). In 2008, plant environment had no effect on photosynthetic rates of leaves that had been excised and re-hydrated prior to measurement. For both years, there was a significant N-fertility x canola cultivar interaction controlling photosynthetic rates ($P=0.03$ and $P=0.02$ for 2007 and 2008 respectively) (Table 2).

In 2007, SLA was higher ($P=0.03$) for Sentry than for 46A65 (Table 2). In 2008, SLA was

Table 2

Effects of canola cultivar and plant environment on photosynthetic rates (A_{400}) and specific leaf area (SLA) of canola leaves grown in 2007 and 2008. Also displayed are significant interactions between fertilizer-N rate x canola cultivar in controlling photosynthetic rates. Standard errors are shown in parentheses. Italicized lower-case letters represent statistically different ($\alpha = 0.05$) means, according to Tukey's HSD test.

		46A65	Q2	Sentry	TBI – 1 m	TBI – 4 m	TBI – 7 m	CM
A_{400} ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	2007 0 kg ha ⁻¹	16.88 <i>a</i>	16.14 <i>a</i>	16.95 <i>a</i>				
		(0.96)	(1.20)	(1.04)				
		18.74 <i>a</i>	16.88 <i>a</i>	16.60 <i>a</i>				
		(0.92)	(0.73)	(1.12)				
	40 kg ha ⁻¹	20.82 <i>ab</i>	22.02 <i>a</i>	18.32 <i>b</i>	16.38 <i>b</i>	19.37 <i>a</i>	19.51 <i>a</i>	19.71 <i>a</i>
		(0.82)	(0.69)	(1.16)	(0.72)	(0.61)	(0.57)	(0.47)
	80 kg ha ⁻¹	20.00 <i>a</i>	21.91 <i>a</i>	18.84 <i>a</i>				
		(1.31)	(0.79)	(1.05)				
	2008 0 kg ha ⁻¹	Polo	Topas	04C204				
		8.33 <i>a</i>	9.86 <i>a</i>	9.88 <i>a</i>				
		(0.51)	(0.58)	(0.49)				
		9.82 <i>a</i>	10.81 <i>a</i>	10.34 <i>a</i>				
	40 kg ha ⁻¹	(0.58)	(0.62)	(0.41)	11.06 <i>a</i>	10.66 <i>a</i>	10.77 <i>a</i>	11.02 <i>a</i>
		10.87 <i>b</i>	12.91 <i>a</i>	11.12 <i>b</i>	(0.36)	(0.32)	(0.34)	(0.33)
	80 kg ha ⁻¹	(0.58)	(0.53)	(0.52)				
		11.41 <i>b</i>	13.76 <i>a</i>	11.31 <i>b</i>				
	120 kg ha ⁻¹	(0.64)	(0.57)	(0.54)				
SLA ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$)	2007	46A65	Q2	Sentry				
		267.11 <i>b</i>	281.49 <i>ab</i>	292.77 <i>a</i>	314.71 <i>a</i>	281.96 <i>b</i>	286.26 <i>ab</i>	238.88 <i>c</i>
		(6.16)	(6.68)	(7.52)	(8.07)	(5.36)	(8.68)	(5.12)
		Polo	Topas	04C204				
	2008	347.6 <i>a</i>	329.5 <i>b</i>	340.3 <i>ab</i>	352.0 <i>a</i>	347.1 <i>a</i>	346.3 <i>a</i>	311.2 <i>b</i>
		(5.19)	(4.87)	(5.01)	(5.86)	(5.66)	(6.09)	(5.08)

higher ($P<0.01$) for Polo than for Topas. In both years, SLA was higher ($P<0.01$) in the TBI than in the CM system. In 2007, SLA was higher ($P<0.02$) at 1 m than at 4 m from poplar rows.

5.4. Soil moisture, microbial biomass and potential nitrification

Average soil water content in 2008 was about 3% lower ($P<0.01$) with Topas than with the two other cultivars (data not shown). In both years, soil water content was higher ($P<0.01$) in the CM than in the TBI system (Table 3).

Table 3

Effects of plant environment (TBI at 1, 4 and 7 m distance from poplar rows, and CM) on soil water content and potential nitrification rates. Different lower-case letters in *italic* represent statistically significant ($P<0.05$) means within each year, according to Tukey's HSD test. Standard errors are shown in parentheses.

		TBI – 1 m	TBI – 4 m	TBI – 7 m	CM
Soil water content ($\text{g}_{\text{water}} \text{g}_{\text{soil}}^{-1}$)	2007	0.146 <i>b</i>	0.148 <i>ab</i>	0.146 <i>b</i>	0.157 <i>a</i>
		(0.003)	(0.003)	(0.003)	(0.004)
	2008	0.222 <i>b</i>	0.225 <i>b</i>	0.225 <i>b</i>	0.247 <i>a</i>
		(0.002)	(0.002)	(0.002)	(0.003)
Potential nitrification ($\mu\text{g NO}_3\text{-N g}_{\text{soil}}^{-1} \text{mo}^{-1}$)	2007	1.29 <i>a</i>	1.27 <i>a</i>	1.45 <i>a</i>	1.52 <i>a</i>
		(0.53)	(0.36)	(0.37)	(0.54)
	2008	20.29 <i>b</i>	22.31 <i>ab</i>	22.96 <i>ab</i>	24.26 <i>a</i>
		(1.27)	(1.26)	(1.62)	(1.61)

In 2008, there was a canola cultivar x plant environment interaction ($P<0.01$) controlling soil microbial biomass (Fig. 5). More specifically, microbial biomass in the CM system was generally higher with 04C204 and Topas than with Polo. Microbial biomass in the TBI system

was generally higher ($P<0.01$) with 04C204, but the significance of comparisons with the other two cultivars varied according to plant environment.

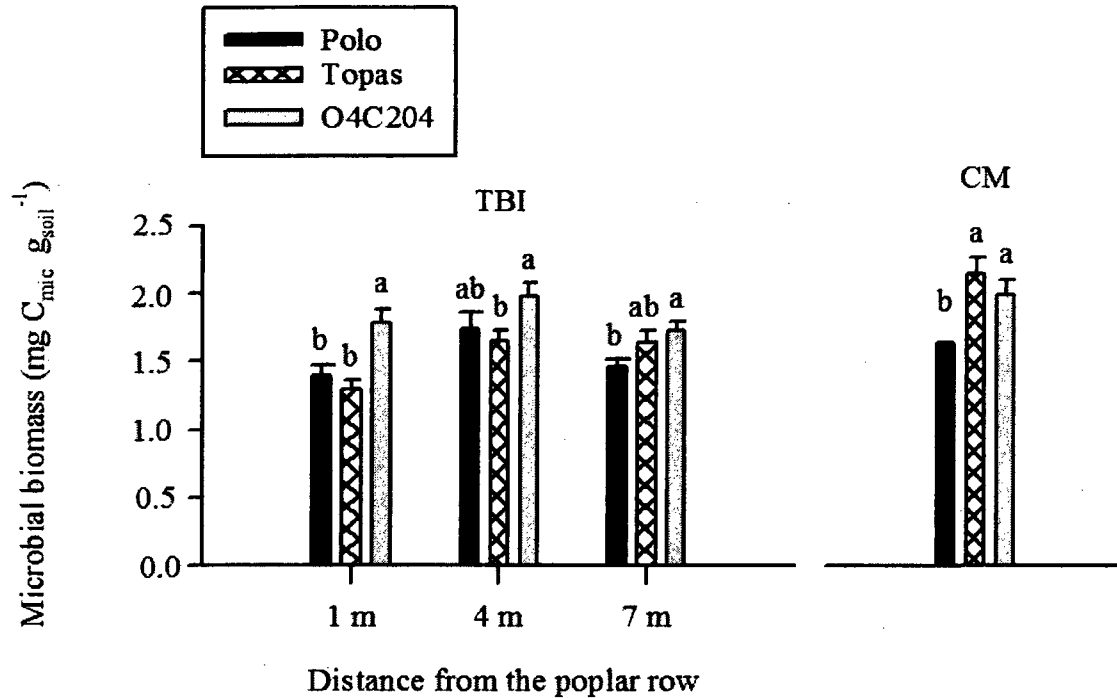


Figure 5. Soil microbial biomass in relation to plant environments and canola cultivars, over the 2008 growing season. Different lower-case letters designate statistically significant ($P<0.05$) means within each cluster according to Tukey's HSD test. Error bars = 1 S.E.

In both years, potential nitrification decreased with proximity to poplar rows, but a significant effect ($P=0.03$) was observed only in 2008 between soils samples from the CM system and TBI subplots at 1 m distance from poplar rows (Table 3).

6. Discussion

The fact that the canola cultivars used in 2007 were not the same as those used in 2008 precludes all comparisons of seed oil concentration and yield between years. Our study was not meant, however, to be a rigorous canola cultivar trial, but rather a first estimate of potential seed oil yields on marginal fallow lands in Quebec, using different fertilizer-N application rates and different cropping systems. The decrease in seed oil concentration with increasing fertilizer N application rate is likely the result of protein synthesis being favoured over oil synthesis when N becomes more abundant. This decrease in seed oil concentration was more than compensated by an increase in total seed yield with increasing fertilizer N application rate, at least up to 80 kg N ha⁻¹. Results thus suggest that optimal yields can be attained on marginal agricultural land in Quebec with 80 kg fertilizer-N ha⁻¹.

In the TBI system, a reduction in seed oil concentration and yield occurs in close proximity to poplar rows. Lower yields at 1 m distance from poplar rows could be due to light interception by the tree canopy. This is corroborated by the higher SLA observed at this distance in 2007, since SLA usually responds positively to reductions in light intensity (Jurik and Van, 2004). We did not observe significantly higher SLA at this distance in 2008, perhaps because of more daylight hours in 2007 (266 mm rainfall; 173 cooling degree days) compared to 2008 (369 mm rainfall; 154 cooling degree days), such that differences in SLA due to shading were more pronounced in the sunnier year. Hybrid poplar is a fast-growing tree crop with a high soil water demand, and this also could contribute to reduced yields at 1 m distance from poplar rows. This is corroborated by differences observed in A_{400} between years. More specifically, A_{400} at 1 m distance was significantly lower when measurements were made on non-excised leaves experiencing *in situ* soil water potential (i.e. 2007), but not when leaves were excised and rehydrated prior to measurement (i.e. 2008). Finally, the potential nitrification data provide only weak support that lower yields at 1 m distance from poplar rows were due to

lower soil N supply. Adequately testing for N deficiency would require a measurement of leaf N concentration which we can be combined with A_{400} values to derive photosynthetic N use efficiency (PNUE). Notwithstanding the lower yields observed at 1 m distance from poplar rows, our study shows that average yields can be maintained when canola is intercropped with fast-growing hybrid poplar at 8 m intervals, for at least five years following the implementation of this cropping system.

In 2007, we did not expect higher seed oil concentration and yield with Sentry than with Q2, as these two cultivars had been respectively reported as being medium and high in seed oil (Rimmer et al., 1998; Stringam et al., 1999). The climate in Quebec is generally cooler and wetter than in central and western Canada where these cultivars have been tested, and this may have reordered the relative performance of the two cultivars. Results emphasize, therefore, the limit to which the relative performance of canola cultivars can be generalized beyond regional growing conditions. In 2008, it is interesting to note the poor correlation between each cultivar's seed oil concentration, photosynthetic rate or specific leaf area, and its yield.

Contrary to expectation, we did not find a relationship between fertilizer N application rate and soil N_2O emissions. It is possible that most of the fertilizer-N had already been immobilized or lost (volatilized or leached) by the time N_2O measurements began, nearly two months following fertilizer application. On the other hand, we found a substantial three-fold increase of N_2O emissions in the CM system, when compared to the TBI system. Thevathasan et al. (2004) hypothesized that TBI systems could reduce N_2O emissions based on better fertilizer N utilization by both alley crops and trees resulting in lower available NO_3^- for denitrifiers. In our study, potential nitrification was indeed lower in the TBI than in the CM system. It is also possible that TBI systems reduced N_2O emissions by reducing soil moisture. Given that hybrid poplar is a fast growing species with extensive lateral roots, its high demand for soil water is likely met by foraging the solum well into the alley. This is corroborated by the lower soil moisture contents found at various distances in our TBI plots. Lower N_2O

emissions provide a further incentive for landowners to adopt TBI systems, based on current and proposed cap-and-trade programs that reward production systems that limit GHG emissions (e.g. European Commission, 2008).

We did not expect to find an effect of cultivars on N₂O emissions. Given that nitrification and soil water content were not higher under cultivar 04C204, we hypothesize that the higher N₂O emissions with this cultivar was due to greater rates of rhizodeposition alleviating C limitation among heterotrophic denitrifying bacteria. This is corroborated by a higher microbial biomass under cultivar 04C204. The implication of this cultivar effect is important, given that the cultivar with the best seed oil yield is also the one with the highest rate of N₂O emission.

7. Conclusion

In our study, we have shown that seed oil yields of up to 2.8 Mg ha⁻¹ can be obtained in either TBI or CM systems on marginal farmland in Southern Quebec. According to the 2009 Automotive Consumer Guide (HowStuffWorks Inc., 2009), a 4-cylinder mid-size car's average fuel consumption is 10.6 km l⁻¹, such that it would take approximately 0.67 ha of marginal land to fuel this mid-size car to run 20,000 km year⁻¹. These yields occur, however, under optimal fertilizer and cultivar conditions that are not necessarily environmentally sound. There is a need, therefore, to conduct life cycle assessments for analyzing the trade-offs between canola seed oil yields and environmental impacts brought on by the production and application of fertilizer-N, or by the choice of cropping system and canola cultivar that substantially affect N₂O emissions. In a first instance, our study allows us to conclude that our model TBI system did not compromise canola seed oil yields, and substantially reduced soil N₂O emissions.

Acknowledgments

The authors are grateful to Mrs. M. Arès for allowing us to perform this study on her farm. We thank the Plant Biotechnology Institute (Saskatoon) for analyzing seed oil concentrations in 2007. Drs. D. Rivest, A. Vanasse and B. Shipley provided useful agronomic and statistical advice. We thank undergraduate students M. Bergeron, J. Bradley, M. Lanoix, X. Francoeur, P. Grégoire, G. Joannisse, H. Marie Johansen, A. Lamarche, J. Quirion, D. Robert, R. Roy and M. Thibeault, who provided technical assistance. The project was supported financially by the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) and the Green Crop Network (GCN).

8. References

- Allen, S.C., Jose, S., Nair, P.K.R., Brecke, B.J., Nkedi-Kizza, P., Ramsey, C.L., 2004. Safety-net role of tree roots: evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch) - cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Forest Ecol. Manag.* 192, 395-407.
- Anderson, J.P.E., Domsch, K.H., 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.* 10, 215-221.
- Angadi, S.V., Cutforth, H.W., McConkey, B.G., Gan, Y., 2003. Yield adjustment by canola grown at different plant populations under semiarid conditions. *Crop Sci.* 43, 1358-1366.
- Bradley, R.L., Fyles, J.W., 1995. A kinetic parameter describing soil available carbon and its relationship to rate increase in C mineralization. *Soil Biol. Biochem.* 27, 167-172.
- Bradley, R.L., Olivier, A., Thevathasan, N.V., Whalen, J., 2008. Environmental and economic benefits of tree-based intercropping systems. *Policy Options* 29, 46-49.
- Canola Council of Canada, 2008a. Canola Socio-Economic Value Report. Accessed February 10th 2010. http://www.canolacouncil.org/uploads/Canola_in_Canada_Socio_Economic_Value_Report_January_08.pdf.
- Canola Council of Canada, 2008b. Prairie Canola Variety Trials Test Results 2008. Accessed February 10th 2010. http://www.canola-council.org/uploads/pcvt/PCVT_Final_2008_web.pdf.
- Conseil des productions végétales du Québec inc. - Comité Oléoprotéagineux, 1996. Oléoprotéagineuses - Canola. Accessed February 10th 2010. <http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/V9610.pdf>.
- CRAAQ (Ed.), 2003. Guide de référence en fertilisation, 1st ed. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Ste-Foy.
- European Commission, 2008. EU Action against climate change - The EU Emissions Trading Scheme. Accessed February 10th 2010. http://ec.europa.eu/environment/climat/pdf/brochures/ets_en.pdf.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Van Dorland, R., 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, in: Solomon, S.,

Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York, pp. 129-234.

Garnier, E., Shipley, B., Roumet, C., Laurent, G., 2001. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content. *Funct. Ecol.* 15, 688-695.

Gordon, A.M., 2008. Agroforestry in the World: Lessons for Canada. *Policy Options* 29, 50-53.

HowStuffWorks Inc., 2009. Consumer Guide® Automotive. Accessed February 10th 2010. <http://consumerguideauto.howstuffworks.com/>.

Hutchinson, G.L., Mosier, A.R., 1981. Improved Soil Cover Method for Field Measurement of Nitrous Oxide Fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 311-316.

Jurik, T.W., Van, K., 2004. Microenvironment of a corn-soybean-oat strip intercrop system. *Field Crop Res.* 90, 335-349.

Nordic Genetic Resource Center (NordGen), 2009. Topas, on: Sesto. Accession number: NGB2695. Accessed February 10th 2010. <http://www.nordgen.org/index.php/skand/content/view/full/344>.

Peichl, M., Thevathasan, N., Gordon, A., Huss, J., Abohassan, R., 2006. Carbon Sequestration Potentials in Temperate Tree-Based Intercropping Systems, Southern Ontario, Canada. *Agroforest. Syst.* 66, 243-257.

R Development Core Team, 2009. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, <http://www.R-project.org>.

Rahman, M.H., Joersbo, M., Poulsen, M.H., 2001. Development of yellow-seeded Brassica napus of double low quality. *Plant Breed.* 120, 473-478.

Rimmer, S.R., Scarth, R., McVetty, P.B.E., 1998. Sentry summer rape. *Can. J. Plant Sci.* 78, 615-616.

Statistique Canada, 2006. Recensement de l'agriculture. Accessed February 10th 2010. <http://www.statcan.gc.ca/ca-ra2006/index-fra.htm>.

Stringam, G.R., Degenhardt, D.F., Thiagarajah, M.R., Bansal, V.K., 1999. Q2 summer rape. *Can. J. Plant Sci.* 79, 597-598.

Tessier, A., St-Onge, F., Gariépy, S., 2009. Le paysage rural au Québec : enjeux agricoles et solutions agroforestières. Accessed February 10th 2010. http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/BB6D226A-8EAD-40B2-A64B-7628F217D356/0/Documentder%C3%A9flexionsurlepaysagerural_20090605.pdf

Thevathasan, N.V., Gordon, A.M., 2004. Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada. *Agroforest. Syst.* 61, 257-268.

United States Department of Agriculture, 2008. World Agricultural Production. Accessed February 10th 2010. <http://www.fas.usda.gov/wap/circular/2008/08-12/productionfull12-08.pdf>.

Wong, S.C., Cowan, I.R., Farquhar, G.D., 1979. Stomatal conductance correlates with photosynthetic capacity. *Nature* 282, 424-426.

CHAPITRE 2

PERSPECTIVE DES RENDEMENTS ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CULTURES DE PREMIÈRE ET DEUXIÈME GÉNÉRATION DESTINÉES À LA PRODUCTION DE BIOCARBURANTS

1. Avant-propos

Ce chapitre tente de répondre à trois questions qui viennent élargir la portée des conclusions tirées dans le premier chapitre de ce mémoire :

- Quelle culture offre un rendement maximal pour la production de biocarburants ?
- Quel est l'impact environnemental associé à la production de biocarburants ?
- Quelle superficie agricole est nécessaire pour substituer nos besoins en combustibles fossiles par des biocarburants ?

Il continue donc sur les mêmes concepts théoriques que le premier chapitre, mais il tente également d'élargir la portée de ces concepts à d'autres grandes cultures destinées à la production de biocarburants au niveau mondial et à les comparer selon les thématiques suggérées par ces trois questions. Il tente également d'établir les différences entre les cultures de biocarburants de première et deuxième génération, afin d'illustrer les différences essentielles entre ces types de culture et les bénéfices apportés par la deuxième génération en comparaison à la première.

Ce chapitre veut également informer le lecteur sur les enjeux présents dans la production de biocarburants, comme ceux de la compétition de cette production avec les ressources alimentaires ou la superficie et le type de terres que l'on peut affecter à la production de

biocarburants. Bien que plusieurs publications scientifiques aient déjà fait des études de cycle de vie sur la majorité des cultures en fonction de leur production de biocarburants, il reste tout de même pertinent de faire une revue de littérature qui permettent de les comparer mutuellement. Malgré tout, ce chapitre ne se définit pas comme une analyse de cycle de vie en soi, mais bien comme une comparaison d'un grand nombre de cultures différentes sur certains points-clés de la production de biocarburants.

Pour ce chapitre, mon superviseur Dr. Robert L. Bradley a eu l'idée originale d'élaborer sur les différences entre biocarburants de première et deuxième génération selon les aspects importants du premier chapitre et a fourni certaines pistes de discussion à partir de publications scientifiques. J'ai rédigé la totalité du manuscrit en m'inspirant des publications suggérés par mon superviseur et d'autres publications scientifiques trouvées au fil de mes recherches. Ce chapitre ne sera pas soumis pour fin de publication à une revue scientifique.

2. Introduction

L'intérêt général pour la recherche et le développement des biocarburants découle essentiellement de deux enjeux socio-économiques majeurs. Tout d'abord, les fluctuations du prix du baril de pétrole et les incertitudes liés à son approvisionnement dans les prochaines décennies encouragent les recherches et le développement de source d'énergie renouvelable pouvant éventuellement remplacer, en tout ou en partie, les combustibles fossiles. Aussi, la conscientisation des populations et de leur gouvernement au phénomène du réchauffement climatique planétaire amène les consommateurs de combustibles fossiles à rechercher des énergies moins polluantes pour combler leurs besoins énergétiques. En date de l'année 2004, les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) provenant de la combustion des combustibles fossiles représentaient près de 60 % de toutes les émissions de gaz à effet de serre de nature anthropogénique (IPCC, 2007). Le panneau intergouvernemental sur les changements climatiques estime que ces émissions de gaz à effet de serre ont de fortes probabilités de contribuer directement au réchauffement du climat, ce qui pourrait avoir des conséquences catastrophiques sur les populations humaines par le biais d'inondations côtières, de désertification, d'événements climatiques extrêmes plus fréquents ainsi que de problèmes d'approvisionnement et de qualité de l'eau. Ces conséquences auraient aussi de graves répercussions sur les écosystèmes naturels (IPCC, 2007).

L'utilisation des biocarburants est une façon très prometteuse, à première vue, de contrôler l'augmentation des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère. Ils sont des produits chimiquement dérivés d'éléments végétaux fabriqués par le biais de la photosynthèse à partir du CO_2 atmosphérique. Ce CO_2 fixé par la photosynthèse est donc relâché durant la combustion du biocarburant et peut de nouveau être fixé par les plantes, et ainsi servir à nouveau de biocarburant. De plus, la croissance intensive de matières végétales, qui est

possible actuellement grâce à l'agriculture, est un processus renouvelable, pratiqué depuis des siècles et pour lequel il existe une grande expertise ainsi que de grands moyens techniques.

Par contre, certaines considérations moins évidentes viennent ajouter un bémol à la promotion des biocarburants comme énergie verte et renouvelable. L'agriculture moderne fait face à de plus en plus de critiques de la part des environnementalistes. D'une part, ces derniers dénoncent l'ajout important de produits chimiques herbicides ou pesticides et d'intrants fertilisants se retrouvant subséquemment sous une forme polluante dans l'environnement. D'autre part, ils dénoncent également la déforestation de grandes superficies de terres en vue d'utiliser les sols pour l'agriculture, détruisant ainsi les habitats des animaux vivant dans l'écosystème forestier originel et appauvrissant considérablement les sols par l'érosion de la matière organique et le lessivage des nutriments. Aussi, les terres agricoles produisant présentement de la nourriture pour nourrir les populations humaines directement ou indirectement, par les animaux d'élevage. L'augmentation des superficies agricoles produisant des biocarburants pourraient donc résoudre en partie la crise énergétique que l'on vit présentement aux dépens d'une crise alimentaire mondiale éventuelle.

De nouvelles avenues dans le développement des biocarburants pourraient peut-être pallier aux différentes problématiques rencontrées présentement. En effet, les biocarburants peuvent se classer en deux catégories: les biocarburants de première et deuxième génération. Les biocarburants de première génération sont dérivés à partir des récoltes de culture alimentaire, soit le bioéthanol par la fermentation des sucres contenus dans les grains récoltés, ou encore le biodiesel par la transestérification des acides gras contenus dans ces mêmes grains. Les biocarburants de deuxième génération sont quant à eux dérivés à partir des composantes structurales (parois cellulosiques et lignine, majoritairement) de la biomasse résiduelle des cultures n'ayant pas été récoltées, des cultures, comme celle du panic érigé, ne servant pas à l'industrie alimentaire, ou encore des résidus industriels tels que les copeaux de bois et les écorces, par exemple. La production de biomasse est possible à grande échelle, sans faire

compétition avec les ressources alimentaires, mais il est pertinent de se pencher sur les conséquences environnementales de la culture de ces biocarburants de deuxième génération, en vue de les comparer à ceux de la première génération et de savoir ainsi si cette alternative est vraiment prometteuse.

Dans ce chapitre, il sera donc question de mettre en perspective les avantages et les inconvénients des biocarburants de première et de deuxième génération selon trois aspects importants ressortis dans la publication constituant le premier chapitre de ce mémoire : les intrants fertilisants apportés aux cultures agricoles, les émissions de gaz à effet de serre par les terres agricoles ainsi que les superficies agricoles nécessaires pour la production de biocarburants. Bien qu'il soit également possible de brûler la biomasse végétale pour produire de l'énergie, cet aspect ne sera pas développé dans le présent chapitre pour mieux cerner les enjeux exclusifs des biocarburants.

3. Développement

3.1. Intrants fertilisants

L'ajout d'intrants fertilisants permet d'augmenter considérablement les récoltes des cultures agronomiques, si bien qu'ils font maintenant partie intégrante de la gestion des terres agricoles. L'aspect des intrants fertilisants est important lorsqu'il s'agit de comparer les biocarburants de première et de deuxième génération car ils représentent un enjeu économique important pour le producteur, ainsi qu'un enjeu environnemental vital du point de vue de la santé des plans d'eau et des émissions de gaz à effet de serre par les terres agricoles.

La figure 6 présente un portrait général des intrants en fertilisants azotés et des rendements moyens de biocarburants (éthanol ou biodiesel) de cinq cultures de première génération (le maïs, le soya, le colza/canola, la canne à sucre ainsi que le palmier à huile) et quatre cultures de deuxième génération (le panic érigé, le saule, le peuplier hybride et les cultures de grande diversité à faible intrants). Les estimations sur les intrants en fertilisants azotés nécessaires pour les cultures, les rendements de ces dernières ainsi que les facteurs de conversion des produits de récolte en éthanol ou en biodiesel proviennent des sources suivantes : le « world fertilizer use manual » (manuel mondial de l'utilisation des fertilisants) (1992), Vogel et al. (2002), Parrish et Fike (2005), Adegbiidi et al. (2001), Tilman et al. (2006), les statistiques de la FAO (2010), Laureysens et al. (2004), Riemenschneid et al. (2001), Scarascia-Mugnozza et al. (1997), Adler et al. (2007) et Goldemberg (2008). Dans tous les cas, un facteur de 0.90, utilisé dans l'article d'Adler et al. (2007), fut appliquée aux valeurs potentielles pour tenir en compte des pertes liées à la conversion des grains ou de la biomasse en biocarburant.

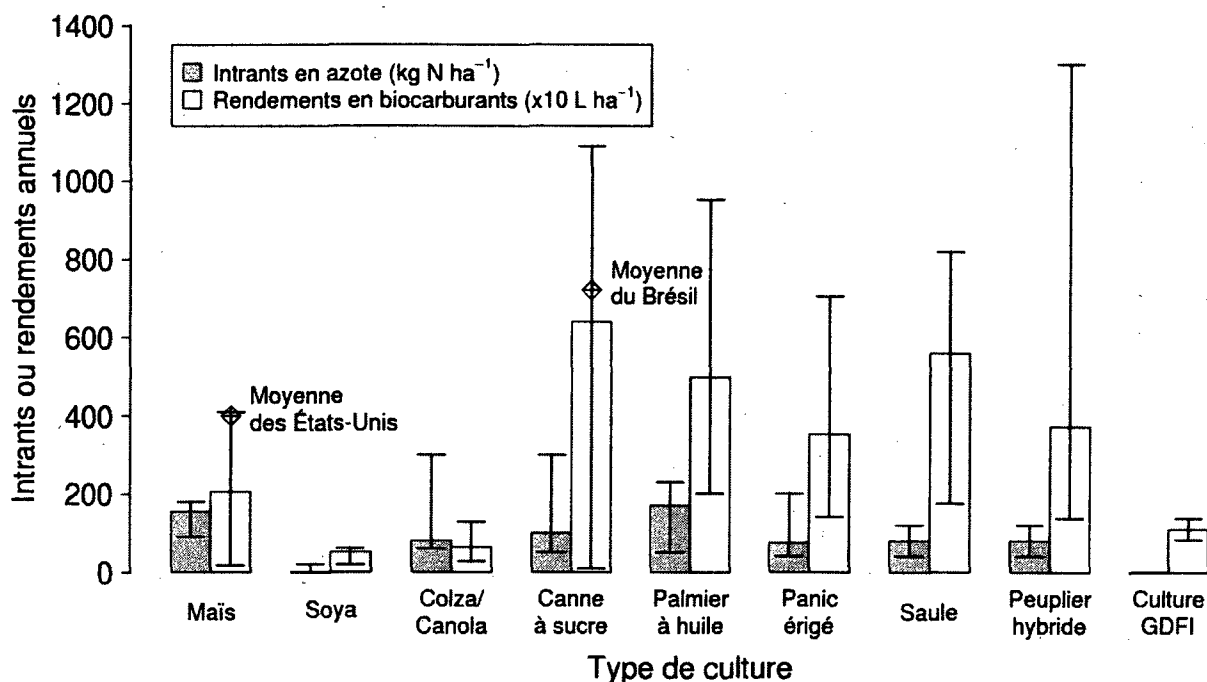


Figure 6. Intrants de fertilisants azotés et rendements en biocarburants de cinq cultures de première génération et quatre cultures de deuxième génération. Les barres d'erreur montrent l'étendue des intrants ou rendements de la littérature citée dans le texte. L'acronyme GDFI signifie « grande diversité à faible intrants », traduit de l'anglais LIHD (low-input high-diversity), introduit par Tilman et al. (2006).

Tout d'abord, les conclusions à tirer de la figure 6 doivent demeurer prudentes, puisqu'elle ne présente pas l'ensemble des cultures de première et deuxième génération pouvant servir à la production de biocarburants et que l'étendue des estimations pour certaines cultures peuvent être incomplètes. Néanmoins, il est possible de voir que les intrants varient beaucoup au sein de chaque culture en fonction des régions où celle-ci est établie. Par exemple, le colza européen est une variété hivernale et demandent facilement plus de 200 kg N ha⁻¹, alors que son homologue nord-américain, le canola, est une variété printanière ne demandant guère plus de 80 kg N ha⁻¹. La canne à sucre peut demander plus de 200 kg N ha⁻¹ dans les régions d'Asie

du sud-est, mais pousse très bien avec parfois moins de 65 kg N ha^{-1} au Brésil, puisque certaines variétés brésiliennes sont fixatrices d'azote (Boddey et al., 1991). Le palmier à huile requiert aussi moins de fertilisants en Afrique (environ 150 kg N ha^{-1}) qu'en Asie du sud-est (presque 200 kg N ha^{-1}). En somme, les biocarburants de deuxième génération n'exigeront souvent pas plus de 100 kg N ha^{-1} pour démontrer des rendements optimaux, contrairement à la majorité des cultures de biocarburant de première génération. Une étude faite par Bouwman et al. (2010) sur les perspectives des cultures de biocarburants et leur impact sur le cycle global de l'azote abonde dans le même sens, prédisant un besoin nutritionnel moyen à l'échelle mondiale de 100 kg N ha^{-1} pour les biocarburants de première génération et seulement de 60 kg N ha^{-1} pour ceux de la deuxième génération en 2050 avec l'évolution des potentiels agronomiques des cultures (meilleurs rendements et meilleur efficacité d'utilisation de l'azote).

De façon similaire, les rendements sont également très différents d'une région à l'autre. Certains pays sous-développés ou en développement ne possèdent par les moyens techniques pour obtenir des rendements optimaux pour des cultures comme la canne à sucre ou le maïs, et certains pays ne jouissent pas d'un climat idéal pour la croissance de certaines cultures. Par contre, la figure 6 montre que les rendements des biocarburants de deuxième génération sont généralement meilleurs que ceux de première génération. En effet, la canne à sucre brésilienne est probablement la seule culture de première génération capable de faire compétition de façon avantageuse avec les cultures de deuxième génération avec des quantités restreintes (c'est-à-dire moins de 100 kg N ha^{-1}), compte tenu du faible rendement par superficie en biocarburant de la culture de soya et des exigences nutritionnels très élevées du palmier à huile.

Cette diminution d'intrants de fertilisants azotés pour des rendements généralement meilleurs se traduirait donc en un lessivage moins important de ces fertilisants dans l'environnement, aidant ainsi dans la lutte contre l'eutrophisation des cours d'eau. Une étude produite par Diaz et Rosenberg (2008) fait état des conséquences du lessivage des nutriments comme l'azote dans les environnements côtiers du monde, et rapporte qu'environ 400 « zones mortes » existent

aujourd'hui dans les mers du monde, et que ces zones couvrent une superficie d'environ 245 000 km². Selon cette étude, une réduction significative et une meilleure gestion de la quantité de nutriments dans les cultures pourraient permettre de réduire la prolifération bactérienne qui épuise les réserves d'oxygène dissous des environnements côtiers, ce qui permettrait un gain annuel d'environ 343 000 à 734 000 tonnes de carbone organique dans les écosystèmes marins, dont 25 à 75 % se retrouvent ensuite chez les prédateurs mobiles, qui sont une ressource cruciale au secteur économique des pêcheries. Une diminution d'intrants de fertilisants azotés se traduit également par une émission moins importante de gaz à effet de serre comme l'oxyde nitreux (N₂O) par les terres agricoles, qui sera discuté plus en détail dans la prochaine section.

Les effets néfastes des intrants fertilisants sur l'environnement font miroiter un scénario alternatif dans la production de biocarburants, celui de ne pas fertiliser les cultures. Cette approche pourrait être adoptée pour certains types de culture, comme les cultures GDFI sur les terres agricoles marginales. Cependant, une telle pratique aurait de nombreux inconvénients si l'on veut minimiser l'espace réservée aux cultures de biocarburants sur les terres agricoles. La plupart de ces terres auraient besoin de périodes très fréquentes de jachère ou de rotation avec des plantes légumineuses comme le trèfle ou la luzerne pour fixer de l'azote. Les rendements seraient médiocres, de l'ordre de quatre à cinq fois moindre qu'une fertilisation optimale d'après Erisman et al. (2010), ce qui demanderait une superficie de culture beaucoup plus grande. Certaines cultures agronomiques ont également de la difficulté à produire des graines lorsqu'elles éprouvent une déficience en nutriments, ce qui nuirait considérablement aux rendements potentiels des cultures de biocarburants de première génération. De plus, l'appauvrissement du sol en général peut mener à une baisse importante de rentabilité pour les producteurs, ainsi qu'à la désertification des sols dans les régions plus sèches.

L'une des manières les plus prometteuses de diminuer l'impact environnemental des intrants fertilisants est par la manipulation génétique des cultures, ce qui permettrait d'accroître l'efficacité de celles-ci à assimiler les nutriments dont elles ont besoin pour optimiser leur

croissance (e.g. Hirel et al., 2007). Cela permettrait donc de diminuer la quantité d'intrants fertilisants nécessaire pour obtenir des rendements optimaux, ce qui aurait des répercussions bénéfiques majeurs sur la rentabilité des cultures auprès du producteur ainsi que sur l'environnement.

3.2. Émissions de gaz à effet de serre

Les cultures de biocarburants visent à réduire les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère tout en servant d'énergie renouvelable. Malheureusement, les terres agricoles sont également une source importante d'émissions de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l'oxyde nitreux (N_2O). En 2004, les gaz à effet de serre provenant du milieu agricole représentaient environ 14 % des émissions totales de gaz à effet de serre de nature anthropogénique. Les différentes pratiques agricoles associées aux cultures productrices de biocarburants jouent donc un rôle très important dans l'efficacité des biocarburants à mitiger les changements climatiques. La prochaine section mettra en perspectives ces pratiques agricoles pour mieux comprendre les impacts environnementaux des cultures de biocarburant de première et de deuxième génération.

L'une des sources majeures de gaz à effet de serre du secteur agricole provient des fertilisants utilisées pour améliorer les performances agronomiques des cultures. Snyder et al. (2009) rapporte que les coûts associés aux transport et à la manufacture des fertilisants en azote sont de l'ordre de 2.6 à 3.2 kg d'équivalent CO_2 par kg de fertilisant produit. Il rapporte également qu'au niveau mondial environ 1 % de l'azote appliqué sous forme de fertilisants azotés se transforme en N_2O , ce qui se traduit en 4.65 kg d'équivalent CO_2 par kg de fertilisant appliqué. Les valeurs de mitigation et de production de gaz à effet de serre associées aux cultures destinées à la production de biocarburants répertoriées par la figure 6 sont donc présentées dans le tableau 4.

Tableau 4. Valeurs d'émissions de gaz à effet de serre mitigées par l'utilisation de biocarburants et produits par l'utilisation de fertilisants en azote pour différents types de culture associée à la production de biocarburants de première et deuxième génération. On suppose ici un coût de transport et de manufacture de 2.9 kg d'équivalent CO₂ par kg de fertilisant produit ainsi qu'un coût de dégradation du fertilisant sous forme de N₂O de 4.65 kg d'équivalent CO₂ par kg de fertilisant produit (Snyder et al., 2009). Le tableau se base sur les données présentées à la figure 6, avec l'étendue possible répertoriée dans la littérature suivie de la valeur moyenne estimée entre parenthèse.

Type de culture	Mitigation de gaz à effet de serre par la production de biocarburant (kg d'équivalent CO ₂ -C ha ⁻¹)	Quantité de gaz à effet de serre associé à la fertilisation en azote émis (kg d'équivalent CO ₂ -C ha ⁻¹)	Différentiel
Maïs	70-1681 (844)	185-371 (319)	-301-1495 (525)
Soya	108-348 (291)	0-41 (0)	67-348 (291)
Colza/canola	176-843 (418)	124-618 (165)	-442-719 (253)
Canne à sucre	37-4486 (2632)	103-618 (206)	-581-4383 (2426)
Palmier à huile	1313-6218 (3246)	103-474 (350)	839-6115 (2896)
Panic érigé	581-2900 (1450)	82-412 (155)	169-2817 (1295)
Saule	721-3369 (2298)	82-247 (165)	474-3287 (2134)
Peuplier hybride	568-5359 (1532)	82-247 (165)	321-5276 (1367)
Culture GDFI	342-568 (453)	0	342-568 (453)

Le tableau 4 illustre bien comment certaines cultures, comme le maïs, le colza et la canne à sucre, sont à proscrire pour la production de biocarburants lorsque les rendements sont insuffisants, car ils peuvent alors se transformer en producteur net de gaz à effet de serre (et ces estimations ne tiennent pas en compte les coûts associés au transport et à l'épandage des semences et des pesticides/herbicides, ainsi qu'au transport et à la transformation des récoltes). D'autres cultures comme le soya et les cultures GDFI donnent de modestes rendements mais elles présentent également moins de risques de devenir des producteurs nets de gaz à effet de

serre si les rendements ne sont pas optimaux. Les cultures de canne à sucre, palmier à huile, panic érigé, saule et peuplier hybride donnent tous des rendements nettement supérieurs en terme de mitigation de gaz à effet de serre, en moyenne, que les coûts associés à leur fertilisation. La culture de palmier à huile domine le classement, mais elle est également la culture la plus énergivore et donc, celle qui entraîne la plus grande pollution reliée aux intrants fertilisants. Le saule est la culture présentant le plus fort potentiel de mitigation de gaz à effet de serre en moyenne pour une production de moins de 200 kg d'équivalent CO₂-C par hectare de culture, suivi du peuplier hybride et du panic érigé.

Il est aussi important de mentionner les conséquences de la fertilisation en engrais organiques sur les émissions de gaz à effet de serre. En effet, les engrais organiques augmentent les taux de dénitrification dans les sols par rapport à leurs équivalents minéraux car ils fournissent une source de carbone supplémentaire aux micro-organismes du sol, ce qui provoque un appauvrissement des réserves d'oxygène des pores du sol (Paul et Zebarth, 1997). De plus, ces engrais augmentent également le contenu en eau des sols, ce qui bloque les échanges entre les pores du sol et l'atmosphère (Paul et Zebarth, 1997). Finalement, le surplus de carbone apporté par les engrais organiques est habituellement relâché sous forme de dioxyde de carbone comme produit de la respiration microbienne.

L'oxyde nitrique (NO) est également un gaz produit en grande quantité par l'ajout de fertilisants azotés sur les terres agricoles. Il a un impact important dans l'atmosphère en réagissant avec les molécules d'ozone, ce qui diminue la concentration de ce gaz dans l'atmosphère. Bien que l'ozone soit un gaz à effet de serre, il est surtout essentiel comme filtre des rayons ultraviolets provenant du soleil, et une diminution trop importante dans les concentrations atmosphériques de ce gaz pourrait avoir des conséquences néfastes sur les taux d'apparition de cancer de la peau dans les populations humaines.

Certaines cultures de biocarburant de deuxième génération ont également un avantage dans la mitigation des gaz à effet de serre par l'occupation qu'elles font du sol agricole. C'est le cas des cultures pérennes comme le panic érigé et les cultures GDFI, car leur système racinaire permanent confère certaines propriétés bénéfiques au sol. Ainsi, il y a raison de croire que les racines pérennes augmentent la séquestration de carbone dans le sol, que ce soit sous une forme très récalcitrante par l'intégration de ce carbone dans leurs composantes ligneuses ou encore moins récalcitrante par la rhizodéposition de carbone pouvant ensuite se faire immobiliser par les communautés microbiennes. Une étude faite par Mummey et al. (1998) a également établi par le biais de simulations de modèles que les émissions d'oxyde nitreux diminueraient d'environ 31.2 Gg N₂O-N par année si l'on transformait les 10.5 millions d'hectares de terres agricoles marginales aux États-Unis en prairies ou en plantation d'espèces pérennes. Cette diminution serait possible par le biais de mécanismes comme une plus grande aération du sol par le système racinaire développé ainsi qu'une plus grande immobilisation de l'azote du sol par des communautés microbiennes plus importantes.

En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre par le transport des produits récoltés, il tend généralement à diminuer si la biomasse transportée est plus concentrée de façon spatiale. De plus, avec des infrastructures spécialement aménagés pour le transport de grande quantités de biomasse jusqu'à l'usine de transformation (par exemple avec des voies ferrées), ces émissions deviendraient de plus en plus négligeables. L'étude effectuée par Adler et al. (2007) avec le modèle « DAYCENT » sur différents types de culture destinées à la production de biocarburants a d'ailleurs estimé que la quantité d'équivalent CO₂ émis par les combustibles fossiles utilisées dans le transport des produits récoltés, leur conversion en biocarburant ainsi que leur distribution ultérieure était négatif pour des cultures comme le peuplier hybride et le panic érigé et positive pour les cultures à grains comme la maïs et le soya lorsque comparé au coût de transport, de transformation et d'extraction des combustibles fossiles.

Finalement, la plupart des terres agricoles sont généralement des puits à méthane, puisque les bactéries méthanotrophes qui s'y trouvent consomment le méthane atmosphérique comme source d'énergie. Cependant, la culture de riz est une source majeure de méthane en raison des sols inondés qui crée des conditions anaérobiques propices aux bactéries méthanogènes, qui produisent du méthane lors de la dégradation des sources de carbone qui sont leurs sources d'énergie. La culture de riz est celle qui nourrit directement le plus de personnes sur la planète et actuellement, la paille de cette culture représente la moitié de la biomasse agronomique produite mondialement (Sticklen, 2006). Elle peut être utilisée pour la fabrication d'objets artisanaux, pour nourrir le bétail ainsi que pour la production de papier, mais actuellement elle est plutôt brûlée en majeure partie pour pouvoir répandre sur les rizières les cendres riches en minéraux. Ce processus dégage donc dans l'atmosphère de grandes quantités de CO₂ nouvellement fixé par la photosynthèse des plantes. La production de biocarburant de deuxième génération à partir de cette paille pourrait donc venir compléter les usages que l'on en fait déjà et atténuer les impacts environnementaux de cette culture, à condition de trouver des façons alternatives peu polluantes de donner des apports en minéraux aux rizières et de mettre en place des installations capables de transformer la paille en biocarburant.

3.3. Superficie agricole nécessaire

L'une des principales questions que l'on peut se poser lorsque l'on considère l'alternative des biocarburants comme source d'énergie est celle d'évaluer la superficie de culture nécessaire pour se soustraire, ou du moins réduire, notre dépendance aux combustibles fossiles. La consommation mondiale quotidienne de combustibles fossiles est d'environ 85 millions de barils de pétrole par jour, chaque baril contenant environ 159 L de pétrole. Au total, cela équivaut à environ 5 TL (téralitres ou billions de litres) de pétrole par année. En utilisant les estimations d'économie d'essence par les biocarburants rapportée par Adler et al. (2007) de 0.66 pour l'éthanol et de 0.87 pour le biodiesel, il y aurait donc un besoin annuel de 1.5 TL d'éthanol (1.15 TL de biodiesel) pour pouvoir remplacer 20 % du pétrole consommé

annuellement. Cela correspond respectivement à 440 Mha de superficie à cultiver pour les biocarburants si l'on considère un rendement moyen respectif de 3400 L ha⁻¹ en éthanol ou biodiesel, d'après la figure 6 si on exclut les cultures GDFI. Cette superficie représente donc 11,4 % des terres agricoles mondiales. Par ailleurs, Tilman et al. (2006) estime qu'il y a actuellement 500 Mha de terres agricoles abandonnées mondialement, et que les cultures GDFI implantées sur l'ensemble de ces terres seraient en mesure de déplacer 13 % de la consommation annuelle mondiale de pétrole, ce qui éliminerait 15 % des émissions annuelles de CO₂ dans l'atmosphère. Ensemble, ses statistiques démontrent que la mise en place d'un mouvement mondial de culture de biocarburant serait faisable et pourrait réduire la consommation de combustibles fossiles d'environ 33 %, mais il reste que ses estimations sont optimistes, et qu'en réalité il est fort peu probable que l'ensemble des terres agricoles marginales répondent aussi bien à l'implantation d'une culture GDFI, ou bien encore que l'ensemble des terres agricoles cultivées pour la production de biocarburants soient en mesure de fournir un rendement équivalent à 3400 L ha⁻¹ d'éthanol ou de biodiesel annuellement. De plus, la main d'oeuvre nécessaire pour mettre en oeuvre les cultures GDFI sur les 500 Mha de terres marginalisées serait extrêmement importante, ainsi que les installations nécessaires pour transporter et convertir les cultures en éthanol.

Finalement, certaines percées technologiques pourraient venir diminuer la superficie agricole nécessaire pour remplacer la même quantité de combustibles fossiles. Ainsi, les cultivars sont de plus en plus performants grâce à la recherche effectuée sur la génétique des cultures agronomiques. Il est donc réaliste de penser que les rendements obtenus avec des cultures de biocarburants peuvent augmenter considérablement si cette recherche continue d'être financée. L'étude faite par Bouwman et al. (2010) prédit par ailleurs une augmentation des rendements de 170, 50 et 280 % pour les cultures de maïs, de canne à sucre et de cultures énergétiques ligneuses, respectivement, d'ici 2050 grâce à une meilleure gestion des terres agricoles ainsi qu'aux percées dans le domaine de la biotechnologie. De plus, une étude faite par Sticklen (2008) affirme que d'importantes percées dans le domaine de la biotechnologie pourrait

aboutir au développement de cultures produisant une biomasse plus riche en cellulose, aux dépends des composés plus récalcitrants comme la lignine, ce qui permettrait un rendement plus important en éthanol une fois la réaction enzymatique de la cellulase effectuée. Dans la même étude, l'auteur affirme également que d'autres percées technologiques peuvent aboutir au développement de manières moins coûteuses et plus efficace de synthétiser la cellulase, et que celle-ci peut être amélioré pour présenter une plus grande activité biologique. Finalement, il est également réaliste de penser que les concepteurs automobiles seront eux aussi en mesure de pouvoir fournir des produits plus performants et moins énergivores, à condition bien sûr d'observer un changement dans la tendance à la consommation des populations vers un désir d'acheter ce genre de véhicules.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, il a été démontré que la culture de biocarburants reste une alternative réaliste aux combustibles fossiles lorsque les cultures avec une croissance rapide et importante de biomasse, comme les cultures de deuxième génération, sont considérées au détriment des cultures nourricières traditionnelles. Certaines publications, comme celle de Giampietro et Ulgiati (2005), doutent de la place des cultures destinées à la production de biocarburants à grande échelle dans un monde où la main d'œuvre agricole, les terres cultivables et l'approvisionnement en eau ne cesse de diminuer. Cependant, les avancées technologiques, notamment dans le domaine des biotechnologies avec des procédés de plus en plus abordables et efficaces pour transformer la cellulose en éthanol (Sticklen, 2008) et des connaissances en génétique permettant d'augmenter l'efficacité d'utilisation d'azote des cultures (Hirel et al., 2007), laissent croire que la recherche aura un rôle prédominant à jouer dans la mise en place à grande échelle de ce nouveau secteur énergétique. Il faudra en outre que la gestion des pratiques agricoles reliées à la production de biocarburants s'assure que l'empreinte environnementale de cette production demeure minimale, par le choix de cultures à haut rendement moins énergivores et par une meilleure aide financière et technique apportée aux producteurs. Il faudra également s'assurer qu'une superficie adéquate de terres agricoles soient destinée légalement à la production exclusive de denrées nourricières. Il sera aussi crucial que les entreprises et le gouvernement travaillent de concert afin de développer les technologies mais surtout les lois permettant de régir de façon éclairée cette industrie qui est déjà teintée de controverse. Il est donc important de bien cerner l'aspect socio-économique de toute cette industrie car les producteurs n'y adhéreront qu'à la condition que celle-ci soit rentable et valorisée.

De plus, la possibilité de brûler la biomasse végétale pour la production d'énergie n'est pas sans attrait. De concert avec un développement de la technologie des piles pour les rendre plus

efficaces afin d'alimenter les moteurs électriques, cette avenue permettrait de concentrer le transport de la biomasse végétale aux centrales thermiques et d'utiliser cette énergie pour fournir de l'électricité aux foyers domestiques et aux entreprises. Cela permettrait également de sauter l'étape de conversion de la biomasse en biocarburants, ce qui diminuerait probablement la perte d'énergie entraînée par le processus de conversion.

Enfin, certaines publications parlent déjà de biocarburants de troisième génération, faits à partir des réserves lipidiques d'algues microscopiques (Amin, 2009), qui produiraient de meilleurs rendements que les biocarburants de deuxième génération pour une moins grande consommation de ressources et pourraient même être développés sur les surfaces océaniques. Il est donc de plus en plus probable que les populations humaines prendront éventuellement le virage des biocarburants, et il reste à souhaiter que les cultures de biocarburants pourront s'adapter harmonieusement aux réalités locales des peuples du monde.

5. Bibliographie

Adegbedi, H.G., Volk, T.A., White, E.H., Abrahamson, L.P., Briggs, R.D. and Bickelhaupt, D.H. (2001). Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass Bioenerg.* 20, 399-411.

Adler, P.R., Del Grosso, S.J. and Parton, W.J. (2007). Life-cycle assessment of net greenhouse-gas flux for bioenergy cropping systems. *Ecol. Appl.* 17, 675-691.

Amin, S. (2009). Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae. *Energ. Convers. Manage.* 50, 1834-1840.

Boddey, R.M., Urquiaga, S., Reis, V. and Dobereiner, J. (1991). Biological nitrogen-fixation associated with sugar-cane. *Plant Soil* 137, 111-117.

Bouwman, A.F., Grinsven, J.J.M.V. and Eickhout, B. (2010). Consequences of the cultivation of energy crops for the global nitrogen cycle. *Ecol. Appl.* 20, 101-109.

Diaz, R.J. and Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321, 926-929.

Erisman, J.W., van Grinsven, H., Leip, A., Mosier, A. and Bleeker, A. (2010). Nitrogen and biofuels; an overview of the current state of knowledge. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 86, 211-223.

Giampietro, M. and Ulgiati, S. (2005). Integrated assessment of large-scale biofuel production. *Crit. Rev. Plant Sci.* 24, 365-384.

Goldemberg, J. (2008). The Brazilian biofuels industry. *Biotechnol. Biofuels* 1, 6.

Hirel, B., Le Gouis, J., Ney, B. and Gallais, A. (2007). The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *J. Exp. Bot.* 58, 2369-2387.

IPCC (2007). Climate change 2007: Synthesis report - Summary for policymakers. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. (Geneva; Core writing team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A.).

Laureysens, I., Bogaert, J., Blust, R. and Ceulemans, R. (2004). Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *For. Ecol. Manage.* 187, 295-309.

Mummey, D.L., Smith, J.L. and Bluhm, G. (1998). Assessment of alternative soil management practices on N₂O emissions from US agriculture. *Agr. Ecosyst. Environ.* 70, 79-87.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (2010). Statistiques de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture – FAOSTAT. (Accédé le 10 avril 2010; <http://faostat.fao.org/>).

Parrish, D.J. and Fike, J.H. (2005). The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. *Crit. Rev. Plant Sci.* 24, 423-459.

Paul, J.W. and Zebarth, B.J. (1997). Denitrification during the growing season following dairy cattle slurry and fertilizer application for silage corn. *Can. J. of Soil Sci.* 77, 241-248.

Riemenschneider, D.E., Berguson, W.E., Dickmann, D.I., Hall, R.B., Isebrands, J.G., Mohn, C.A., Stanosz, G.R. and Tuskan, G.A. (2001). Poplar breeding and testing strategies in the north-central US: Demonstration of potential yield and consideration of future research needs. *Forest Chron.* 77, 245-253.

Scarascia-Mugnozza, G.E., Ceulemans, R., Heilman, P.E., Isebrands, J.G., Stettler, R.F. and Hinckley, T.M. (1997). Production, physiology and morphology of *Populus* species and their hybrids grown under short rotation. II. Biomass components and harvest index of hybrid and parental species clones. *Can. J. For. Res.* 27, 285-294.

Snyder, C.S., Bruulsema, T.W., Jensen, T.L. and Fixen, P.E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agr. Ecosyst. Environ.* 133, 247-266.

Sticklen, M.B. (2006). Plant genetic engineering to improve biomass characteristics for biofuels. *Curr. Opin. Biotechnol.* 17, 315-319.

Sticklen, M.B. (2008). Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. *Nat. Rev. Genet.* 9, 433-443.

Tilman, D., Hill, J. and Lehman, C. (2006). Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science* 314, 1598-1600.

Vogel, K.P., Brejda, J.J., Walters, D.T. and Buxton, D.R. (2002). Switchgrass biomass production in the Midwest USA: Harvest and nitrogen management. *Agron. J.* 94, 413-420.

Whichmann, W. (1992). World fertilizer use manual. (Paris; International fertilizer industry association).

CONCLUSION

En conclusion, je crois pouvoir affirmer que les objectifs de recherche de mon projet de maîtrise furent atteints. En effet, nous avons démontré que des rendements de 2.8 tonnes d'huile par hectare sont possibles sur des système de culture intercalaire établis sur des terres marginales du sud du Québec, avec une fertilisation optimale d'environ 80 kg N ha⁻¹. Ceci nous amène à croire que la culture de biocarburants sur les terres marginales est chose possible en concert avec l'implantation de systèmes de culture intercalaire. De plus, nous avons identifié certains cultivars de canola performants pour le climat plus froid et humide de l'est du Canada. Ces cultivars permettront d'optimiser les rendements obtenus avec les cultures de canola par les producteurs québécois. Aussi, nous avons mis en évidence que les systèmes de culture intercalaire peuvent aider à mitiger les émissions d'oxyde nitreux provenant des terres agricoles, pouvant réduire jusqu'à trois fois la quantité de ce gaz à effet de serre produit par une culture de canola poussant sur les terres marginales québécoises. Malgré le fait que les mécanismes expliquant ces réductions aient déjà été rapportées dans la littérature (par exemple, dans Thevathasan et Gordon, 2004), c'est l'une des premières fois que cette réduction d'oxyde nitreux fut détecté sur un système de culture intercalaire en milieu tempéré. Enfin, nous avons découverts que certains cultivars de canola plus performants peuvent également être la source d'émissions accrues d'oxyde nitreux. Bien que nous ne nous attendions pas à trouver cela, il nous a quand même été possible de proposer les mécanismes par lesquelles une telle augmentation peut être possible. Cela vient démontrer le besoin des analyses de cycle de vie avant d'envisager la production massive de biocarburants, afin de trouver les cultivars présentant non seulement de hauts rendements, mais également une empreinte écologique plus modeste.

Le second chapitre prend une tangente plus large et examine non pas un seul mais plusieurs biocarburants cultivés mondialement. Ce chapitre relate des rendements supérieurs possibles avec les biocarburants de deuxième génération en comparaison avec ceux de la première

génération et ce, avec des besoins nutritionnels généralement inférieurs, ce qui réduit les émissions générées par ces cultures en terme d'oxyde nitreux et d'autres gaz à effet de serre associés à la production d'engrais. Cette conclusion cadre exactement avec l'ouverture du premier chapitre, et montre que des rendements élevés sont possibles même avec une empreinte écologique restreinte. De plus, le deuxième chapitre tente de répondre, quoique de façon très théorique, à la question la plus fréquemment posée à propos des biocarburants : « Combien de surfaces cultivables doit-on destiner à la production de biocarburants pour réduire notre dépendance aux combustibles fossiles ? ». Cette réponse démontre qu'avec un peu plus de 10 % de la superficie mondiale des terres cultivables et la majorité des terres marginales, il est possible de réduire d'environ du tiers notre consommation de combustibles fossiles. Ceci nous laisse croire que l'avenue des biocarburants est concevable, et qu'avec les percées technologiques dans le domaine de la biotechnologie pour améliorer la croissance des plantes, leur efficacité à capter les nutriments de leur milieu ainsi que le procédé de transformation de la matière cellulosique en éthanol, il est réaliste d'entrevoir un secteur important de production des biocarburants dans un futur pas si lointain.

Finalement, les prochaines pistes de recherche en lien avec mon projet pourraient s'intéresser au potentiel des cultures de biocarburants de deuxième génération, dont le panic érigé et le saule, en couple avec les systèmes de culture intercalaire sur des terres marginales du sud du Québec pour en déterminer les rendements potentiels. Il serait également intéressant d'utiliser des techniques *in situ* de suivis continus des émissions d'oxyde nitreux, comme la technique d'*Eddy covariance*, afin d'en mesurer l'ensemble des variations temporelles sur le site d'étude. Enfin, il serait pertinent d'évaluer l'impact économique potentiel pour les producteurs agricoles mais également pour toute la société québécoise résultant de la mise en place à grande échelle d'un plan d'afforestation des terres marginales du sud du Québec jumelé à la production de biocarburants.

BIBLIOGRAPHIE

IPCC (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report - Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Geneva; Core writing team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A.).

Rivest, D. and Olivier, A. (2007). Intercropping cultures with leafy trees: what potential for Quebec?. *Forest. Chron.* 83, 526-538.

Statistique Canada (2006). Recensement de l'agriculture. (Accédé le 20 avril 2010; <http://www.statcan.gc.ca/ca-ra2006/index-fra.htm>).

Thevathasan, NV. and Gordon, AM. (2004). Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada. *Agroforest. Syst.* 61, 257-268.